

HEC MONTRÉAL

**Les neurosciences de la collaboration : existe-t-il des activations
neurophysiologiques spécifiques à la collaboration ?**

par

Paul Léné

**Sciences de la gestion
(Option Développement Organisationnel)**

Sous la codirection de
Kevin Johnson, Ph.D. et Pierre-Majorique Léger, Ph.D.

*Mémoire présenté en vue de l'obtention
du grade de maîtrise ès sciences en gestion
(M. Sc.)*

Janvier 2019
© Paul Léné, 2019

Résumé

Les neurosciences constituent un domaine d'intérêt croissant en science de la gestion. Elles offrent un nouvel angle d'analyse sur l'ensemble des phénomènes connus de la discipline et permettent de comprendre les racines neurophysiologiques de certains comportements en organisation dont les conséquences peuvent être autant néfastes que salutaires. Par ailleurs, de nombreux travaux issus du management, du développement organisationnel et des technologies de l'information alimentent les connaissances concernant les dynamiques interindividuelles au sein d'une organisation. Toutefois, rares sont les recherches visant à introduire les neurosciences dans la compréhension de ces mécanismes, étroitement liés aux interactions sociales et notamment la collaboration.

Ce mémoire par article étudie les bases de la collaboration d'un point de vue neuroscientifique. Ils s'intéressent plus précisément à l'activité corticale de chaque participant individuellement ainsi qu'aux interactions entre des membres d'une même équipe. En se basant sur les études antérieures des chercheurs en neurosciences, concentrées sur les dyades, une étude en laboratoire a été menée auprès de 40 participants (20 équipes) à l'aide de méthodes d'hyperscanning. Les résultats de cette étude établissent que l'activité corticale observée est différente lors d'interactions sociales, mais surtout, que la collaboration dans la réalisation d'une tâche en technologies de l'information est associée à une augmentation de la synchronicité de l'activité corticale dans certaines régions du cerveau des membres d'une même équipe. De surcroit, des corrélations ont été établies entre la performance et certaines activations corticales. Les résultats de cette étude contribuent à combler les lacunes en neurosciences sociales, ainsi qu'à apporter un nouvel angle d'interprétation aux enjeux modernes de management et de travail collaboratif.

Mots clés : Neurosciences cognitives, Neurosciences sociales, Développement organisationnel, Collaboration, Hyperscanning, Électroencéphalographie.

Abstract

Neuroscience is a field of growing interest in management science. It offers a new and alternative perception toward all known phenomena of the discipline and make it possible to understand the neurophysiological roots of certain behaviours in organization whose consequences can be as harmful as salutary. Although, many works from management, organizational development and information technologies feed the knowledge about interindividual dynamics within an organization. Nonetheless, rare are the researches aiming at introducing neuroscience into the understanding of these mechanisms, closely related to social interactions and especially collaboration.

The present master thesis, written by article, studies the basis of collaboration from a neuroscientific point of view. It focuses itself on the cortical activity of each participant individually and the interactions between members of the same team. Based on previous studies of neuroscience researchers, focused on dyads, a laboratory study was conducted with 40 participants (20 teams) using hyperscanning methods. The results of this study establish that the observed cortical activity is different during social interactions, but above all, that the collaboration during the accomplishment of an information technology task is associated with an increase of the synchronicity of the cortical activity in certain regions of the brains of team members. In addition, correlations have been established between performance and certain cortical activations. The results of this study contribute to filling the gaps in social neuroscience, as well as to bring a new angle of interpretation to the modern issues of management and collaborative work.

Keywords: Cognitive neuroscience, Social neuroscience, Organizational development, Collaboration, Hyperscanning, Electroencephalography.

Table des matières

Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
Table des matières	v
Liste des abréviations.....	ix
Avant-Propos.....	x
Remerciements	xi
Introduction	1
Mise en contexte.....	1
Des Neurosciences Traditionnelles aux Neurosciences Organisationnelles.	1
Les Neurosciences Organisationnelles et l'Approche Cognitiviste en Organisation.....	4
Objectif de l'étude et questions de recherche	8
Structure du mémoire	10
Informations sur les articles.....	10
Résumé du premier article	11
Résumé du second article.....	11
Contributions et responsabilités personnelles	12
Chapitre 2: Premier Article	17
Abstract	17
Introduction.....	18
Collaboration and competition in neuroscience.	18
Research question.....	19
Hypothesis.....	19
Method.....	20
Subjects.....	20
Hyperscanning.	20

Experimental Protocol.....	21
Cooperation.....	21
Competition.....	22
Single 1 & 2.....	22
Neurophysiological Measures Acquisition.....	22
Data Preprocessing.....	23
 Data Analysis	23
 Results	25
Coherence Results.....	25
Single subject results.....	26
Behavioural results.....	26
 Discussion	27
 Conclusion	29
 Acknowledgements	29
 Financial disclosure	29
 Competing interest.....	30
 References.....	30
 Appendix A – Literature Table.....	37
 Appendix B – Experiment information.....	43
 Appendix C – Equation	44
 Appendix D – Wavelet Coherence Results	45
 Appendix E – Coherence Map	46
 Appendix F – Reaction times comparison.....	47
 Chapitre 3: Deuxième Article.....	49
 Introduction.....	50
 Hyperscanning Methods	50
 Wavelet Transform Coherence	51

Illustrative Research	53
Conclusion	55
References.....	55
Conclusion	59
Rappel des questions de recherche et principaux résultats	59
Contributions.....	61
Limites	62
Application en management.....	65
Recherches futures.....	67
Conclusion générale	69
Bibliographie	70

Liste des tableaux et des figures

Liste des figures

Premier article

Figure 1 – Experimental Information.	43
Figure 2 – Equation	44
Figure 3 – Wavelet Coherence Results	45
Figure 4 – Coherence Map.	46
Figure 5 – Reaction Times Comparison	47

Deuxième article

Figure 1 – Individual and Wavelet Transform Coherence Outputs	52
Figure 2 – Wavelet Transform Coherence Map and Results	54

Liste des tableaux

Tableau 1 – Contributions dans la rédaction des articles	12
--	----

Premier article

Table 1 – Literature Table	37
----------------------------	----

Liste des abréviations

NO : Neurosciences Organisationnelles

NCO : Neurosciences Cognitives Organisationnelles

NCS : Neurosciences Sociales Organisationnelles

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique

IBS : Synchronicité Inter-Cérébral – « *Inter-Brain Synchrony* »

EEG : Électroencéphalographie

NeuroIS : Système de Neuro-Information – « *Neuro-Information Systems* »

WTC : « *Wavelet Transform Coherence* »

SN : Neurosciences Sociales – « *Social Neuroscience* »

NIRS : « *Near Infrared Spectroscopy* »

RT : « *Response Time* »

ICA : « *Indepedant Componant Analysis* »

ANOVA : « *ANalysis Of VAriance* »

FDR : « *False Discovery Rate* »

SFC : « *Superior Frontal Cortex* »

ASD : « *Autistic Syndrome Disorder* »

Avant-Propos

L'autorisation de rédiger ce mémoire par articles a été obtenue par la direction du programme de M.Sc. de HEC Montréal. Ce mémoire a donc été rédigé sous la forme de deux articles. De plus, l'accord de tous les coauteurs de cet article a été obtenu pour qu'il soit présenté dans ce mémoire. Par ailleurs, en septembre 2013, le comité d'éthique en recherche (CER) de HEC Montréal a approuvé ce projet de recherche et toutes les autorisations subséquentes jusqu'en 2019 ont également été obtenues.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes codirecteurs, Kevin Johnson et Pierre-Majorique Léger, pour leur mentorat exceptionnel. Merci pour vos conseils avisés, vos disponibilités et votre support. Je ne vous remercierai jamais assez de m'avoir permis de réaliser ma maîtrise à vos côtés. Votre ouverture et votre tolérance furent certaines des clés de voute de la réussite de mes études. Intégrer l'équipe du Tech3Lab a été pour moi une expérience enrichissante qui, j'en suis sûr, me suivra tout au long de ma carrière professionnelle.

Deux personnes ayant également énormément compté dans la réalisation de mes travaux de recherches sont Alexander et Élise. Sans vous, rien de tout cela n'aurait été possible. Merci également à David, Beverly, Audrey et Brendan pour leur travail au laboratoire.

Je remercie la fondation HEC Montréal pour avoir contribué à mon financement au cours de ma maîtrise.

Je tiens également à remercier ma famille pour leur support et encouragement constant tout au long de mon parcours académique.

J'aimerais remercier mes amis et collègues du Tech3Lab qui m'ont supporté, encouragé, aidé et conseillé tout au long de cette maîtrise. Merci à Karl-David pour avoir su rire de mes plans aussi farfelus qu'impossibles. Merci à Gabrielle pour tes remarques toujours pertinentes et tes (nombreuses) grimaces. Merci à Mario pour toutes les aventures passées et à venir. Merci à Zi, parce que tu es tout simplement impressionnante. Merci à tous, Hasna, Salima, Yasmine, Michael, David, Félix, Floriant, Caroline, Félix, Ariane, Théophile, Jared, Youness et toutes celles et ceux dont je n'ai pas cité le nom.

Last but not least, merci à Yann d'avoir passé de longues heures à éclairer ma lanterne et défier mes idées, cela avant même le début de ma maîtrise ! Tu es un de ceux qui m'ont le plus apporté ces dernières années. Merci infiniment.

Introduction

Mise en contexte

Les neurosciences et le management sont deux domaines fondamentalement distincts. Le premier est dédié à l'étude scientifique du système nerveux, tant du point de vue de sa structure que de son fonctionnement (Bear et Connors, 2016), tandis que le second a pour vocation la mise en œuvre des moyens humains et matériels d'une entreprise pour atteindre ses objectifs (Lallan, 2014). Cependant, depuis maintenant plusieurs années, la recherche et le développement de modèles théoriques rapprochent ces deux disciplines au point d'avoir fait naître un nouveau courant appelé les neurosciences organisationnelles (anglais : *organizationnal neuroscience – ON*) (Becker, Cropanzano et Sanfey, 2011; Clithero, Tankersley et Huettel, 2008; Lee, Senior et Butler, 2012). Les neurosciences organisationnelles constituent l'étude neuroscientifique des comportements organisationnels selon une approche pluridisciplinaire incluant à la fois la recherche en neurosciences et l'analyse des pratiques organisationnelles (Lee et coll., 2012). En effet, la diversification des approches en management fait écho au gain de popularité des neurosciences. Ainsi, les organisations sont devenues des terreaux fertiles d'expérimentation et d'innovation pour la recherche en neurosciences. Toutefois, bien que cette tendance à l'implication des neurosciences dans le développement de nouvelles pratiques organisationnelles soit en pleine ébullition, les neurosciences restent encore à démystifier. La présente introduction abordera dans un premier temps les concepts clés des neurosciences nécessaires à la compréhension de ce mémoire. Ensuite, la question de recherche et les contributions seront présentées. Enfin, un résumé des articles rédigés dans le cadre de ce mémoire et de leur contexte de publication sera réalisé.

Des Neurosciences Traditionnelles aux Neurosciences Organisationnelles.

Les neurosciences reposent sur une approche pluridisciplinaire se situant à la croisée de la biologie, la médecine, la chimie, la physique, la psychologie et les mathématiques (Bear, Connors et Paradiso, 2016). De ce fait, les neurosciences se

subdivisent en de nombreux sous-domaines respectivement aux différentes expertises et niveaux d'analyses. À titre d'exemple, la biochimie rassemble la biologie et la chimie à l'échelle moléculaire, tandis que la neuropsychologie réunit la médecine et la psychologie à l'échelle humaine. Dans le cas des neurosciences organisationnelles, un sous-domaine en particulier est au cœur de l'attention : les neurosciences cognitives (anglais : *cognitive neuroscience*).

Les neurosciences cognitives constituent le champ de recherche dédié à l'étude des mécanismes cérébraux sous-jacents aux fonctions cognitives (ex. langage, raisonnement, émotions, etc.) (Bear, Connors et Paradiso, 2016). En d'autres mots, les neurosciences cognitives ont pour but de comprendre le fonctionnement de notre cerveau d'un point de vue comportemental en se basant sur une compréhension neurobiologique de notre organisme. Plusieurs raisons ont fait de ce domaine un sujet d'intérêt pour les organisations. La première est la possibilité d'interpoler des données autant d'ordre fondamental et biologique (ex. neuroimagerie – enregistrement de l'activité cérébrale) que des données comportementales et psychologiques (ex. index de flexibilité cognitive). Le fait de juxtaposer ces différents types de données permet d'extraire des informations variées et d'interpréter les résultats de façon holistique.

La seconde raison faisant des neurosciences cognitives un domaine au cœur des neurosciences organisationnelles est la volonté d'interpréter les comportements observés et les résultats obtenus en tenant compte du contexte. En effet, l'intégration des causes et des intentions d'un comportement constitue un fondement de l'interprétation des résultats en neurosciences cognitives. Ainsi, les travaux en neurosciences cognitives ne se limitent pas à comprendre le mécanisme de fonctionnement des processus cognitifs. Plutôt, ils les intègrent contextuellement ce qui enrichit grandement les résultats obtenus, mais surtout ils ouvrent la voie à des applications potentielles de ces derniers (Jack, Rochford, Friedman, Passarelli et Boyatzis, 2019; Riedl et Léger, 2016).

Enfin, la troisième raison repose sur la malléabilité des fonctions cognitives (Rosenzweig et Barnes, 2003). Plus précisément, que ce soit par un contexte ou bien par des comportements, il est possible de modifier les mécanismes de fonctionnement d'un individu sur le plan cognitif (Beard et Wolf, 2001; Wight et coll., 2006). De ce fait, les neurosciences cognitives revêtent un intérêt de premier ordre en management, dans la

mesure où elles rendent possible l'induction d'un changement de comportement ou – au minimum – la modification des schémas cognitifs. Il serait donc possible de trouver la clé pour renforcer les comportements bénéfiques pour l'entreprise et, à l'inverse, entraîner une modification des comportements néfastes.

Toutes ces raisons réunies constituent les fondements de l'intérêt des organisations pour les neurosciences et tout particulièrement les neurosciences cognitives. Elles offrent donc un nouvel angle d'analyse intégratif sur l'ensemble des phénomènes observés en entreprises et permettent de mieux comprendre les racines neurophysiologiques de certains comportements en organisation – de leurs causes jusqu'à l'interprétation de leurs conséquences – venant de chaque individu structurant une organisation et possiblement d'agir afin de les influencer durablement.

Certains chercheurs conscients du potentiel des neurosciences cognitives pour les organisations ont théorisé celles-ci et identifié trois approches distinctes permettant d'introduire, si ce n'est d'intégrer, les neurosciences au sein des organisations. La première approche est appelée les neurosciences organisationnelles (anglais : *organizationnal neuroscience* – NO), elle porte les fondements neuroanatomiques de la prise de décision et de la réalisation de comportement en organisation (Becker et coll., 2011). Les travaux émanant de cette approche se concentrent à évaluer le rôle qu'occupe une région spécifique du cerveau dans la prise de décision ou les comportements adoptés. Il s'agit de recherche fondamentale. La seconde approche est appelée les neurosciences cognitives sociales (anglais : *social cognitive neuroscience* – NCS), elle constitue le passage du niveau anatomique au niveau des fonctions exécutives et cognitives en étudiant l'impact du système biologique sur la médiation des comportements et des cognitions sociales (Blakemore, Winston et Frith, 2004). En d'autres mots, les NCS étudient l'influence de nos mécanismes neurophysiologique – tel que le sommeil ou le stress – sur nos comportements sociaux. Enfin, la troisième approche est appelée les neurosciences cognitives organisationnelles (anglais : *organizational cognitive neuroscience* – NCO). L'objectif de l'approche NCO est similaire à celui des NCS, soit d'examiner les comportements et cognitions sociales, mais elle se distingue en étant spécifique au milieu de travail. Ces deux derniers champs de recherche reposent sur une

intégration des données neurophysiologiques, comportementales et psychologiques (Butler et Senior, 2007; Senior et Butler, 2007).

Les nuances entre les trois approches des neurosciences organisationnelles sont fines. Toutefois, elles reflètent avec justesse la nature des travaux de recherche réalisés dans cette discipline. En effet, il est important de comprendre que les travaux en neurosciences possèdent toujours une orientation soit plus neuroanatomique (NO) soit plus comportementale (NCS et NCO). Bien que les NO constituent un domaine de recherche intéressant et nécessaire à la compréhension du fonctionnement de l'organisme au sein du cadre de travail. L'intérêt des organisations pour les neurosciences repose essentiellement dans leurs capacités à améliorer leurs pratiques de management et la compréhension des comportements. Ainsi, les NCO occupent une place prédominante. La prochaine section abordera d'un point de vue théorique les liens entre les neurosciences cognitives et les théories organisationnelles ouvrant la voie à ce type d'arrimage.

Les Neurosciences Organisationnelles et l'Approche Cognitiviste en Organisation.

Un enjeu majeur des neurosciences organisationnelles est d'arriver à s'inscrire dans les modèles et courants théoriques en management. À ce titre, la complémentarité du courant cognitiviste en gestion avec les neurosciences n'est pas passée inaperçue. L'approche cognitiviste en gestion repose sur l'existence d'archétypes et de schémas mentaux qui constituent les cartes mentales d'un individu (Barr, Stimpert et Huff, 1992). Ces cartes mentales sont développées et utilisées par tout un chacun afin de s'adapter à son environnement (ex. le jeudi est une journée idéale pour formuler des demandes à mon gestionnaire – la phrase est une généralisation, mais qui permet à la personne de s'adapter à son environnement de travail). Il est important de noter que les cartes mentales ne sont pas spécifiques au milieu professionnel, elles sont présentes dans toutes les sphères de la vie d'un individu et peuvent être très différentes dépendamment du contexte. Les cartes mentales les plus ancrées dominent la réalité d'un individu et constituent ses fondements identitaires (Barr et coll., 1992; Gioia et Chittipeddi, 1991). Elles permettent notamment d'interpréter et de hiérarchiser la façon de traiter des informations ainsi que de faciliter l'analyse de son environnement en automatisant certains processus mentaux – processus et biais cognitifs. Ces cartes mentales ainsi développées sont relativement internalisées et,

de facto, plus ou moins difficiles à modifier. À titre d'exemple, une organisation réalisant sa transition au numérique après des décennies de travail manuel, connaîtra des résistances, car l'utilité ainsi que la complexité des nouveaux outils est incompatible avec la carte mentale des employés, habitués à travailler avec des outils traditionnels. L'approche cognitiviste supporte l'idée que les pratiques de gestion lorsqu'elles sont stables s'intègrent dans les cartes mentales des individus. Le développement d'une carte mentale est un processus d'apprentissage à long terme, par conséquent la modification d'une carte – surtout si elle est internalisée depuis longtemps – mobilise des ressources cognitives très importantes et demande énormément de temps. En effet, modifier une carte mentale revient à modifier des habitudes de travail, des modes de pensées et parfois même la culture de l'organisation. De ce fait, le collectif implique d'être abordé comme entité à part entière, au même titre que les individus la composant. En effet, une équipe – et même une organisation – est plus que la somme de ses membres. Cette vision gestaltique des organisations est un fondement de l'approche cognitiviste, mais également des neurosciences cognitives.

Le courant cognitiviste emprunte beaucoup dans sa philosophie aux bases des neurosciences à commencer par la notion de plasticité cérébrale (Woolf et Salter, 2000). La plasticité cérébrale rassemble les mécanismes biologiques par lesquels la création de nouvelles connexions neuronales menant à un apprentissage consolidé est possible (Livingston, 1966; Zatorre, Fields et Johansen-Berg, 2012). La notion de carte cognitive est proche de la plasticité cérébrale dans la mesure où, un apprentissage, pour être réalisé, entraîne la création de nouvelles connexions. Dans le cas où il faut modifier la façon dont une chose a été apprise (ex. procédure), alors il sera nécessaire de non seulement créer de nouvelles connexions reflétant le nouvel apprentissage, mais également de défaire (désassembler) les connexions associées aux apprentissages précédemment réalisés et désormais obsolètes.

En réalité, les neurosciences et le courant cognitiviste ont un parcours étonnamment semblable. Les neurosciences ont connu une véritable révolution dans les années 1970-1980 avec le développement de nouvelles méthodes de neuroimagerie, notamment l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM). En parallèle de cette émergence, les pierres angulaires de l'approche cognitive en organisation commençaient

à être posées (Burnes et Bargal, 2017; Marrow, 1977). Toutefois, les neurosciences n'ont – dans un premier temps – suscité l'intérêt des organisations que dans des champs d'application n'étant jusqu'alors pas relatif au management. Plus précisément, les neurosciences ont rapidement été utilisées et intégrées aux grands modèles théoriques par des domaines comme le marketing (Fugate, 2007; Lee, Broderick et Chamberlain, 2007; Spence, 2019), l'économie (Camerer, 2008; Harrison, 2008; Konovalov et Krajbich, 2016; McCabe, 2008) et les technologies de l'information (Dimoka, Pavlou et Davis, 2011), non sans générer la controverse (Lewis et Phil, 2004).

Ce n'est que très récemment que les neurosciences cognitives ont réellement commencé à s'arrimer avec les théories en management et être suffisamment approfondies pour susciter le débat (Ashkanasy, 2003; Becker et coll., 2011; Dulebohn, Conlon, Sarinopoulos, Davison et McNamara, 2009; Lee et coll., 2012; Waldman, Ward et Becker, 2017). Depuis, il devient de plus en plus évident qu'à l'avenir, pour comprendre, prédire et modifier les cognitions et les comportements, il faudra assimiler des mécanismes ascendants (anglais : *bottom-up*) et descendants (anglais : *top-down*) (Becker et coll., 2011; Craver, 2002). Cela signifie que les théories neuroscientifiques et les théories existantes issues de la recherche organisationnelle peuvent s'enrichir mutuellement (Jack et coll., 2019; Mu, Cerritos et Khan, 2018; Pinker et Ullman, 2002). En effet, ces deux disciplines abordent de nombreux enjeux de façon diamétralement opposée et ouvrent par conséquent la voie à des découvertes. À titre d'exemple, l'une des différences philosophiques les plus frappantes entre la recherche en neurosciences et en organisation réside dans leurs conceptions respectives de la conscience humaine. De nombreuses théories sur le comportement au travail impliquent un niveau élevé de contrôle conscient de nos cognitions et de nos actes alors que des travaux en neurosciences suggèrent que nos processus internes et inconscients ont une influence bien plus grande qu'on ne le pense. En effet, les neurosciences ont fourni un très grand nombre de preuves de l'influence des processus non conscients (Dane et Pratt, 2007; Mudrik, Breska, Lamy et Deouell, 2011; Sonenschein, 2007). Parmi les courants de pensée des théories organisationnelles, seule l'approche cognitiviste reflète cette dualité. En effet, la notion de carte mentale abordée précédemment se traduit dans la pratique par des prises de décision et des actes de façon consciente et volontaire. Or, le développement des cartes

mentales repose sur des influences aussi bien conscientes (ex. formation, condition de travail, qualité des relations interpersonnelles, etc.), que non-conscientes (ex. niveau de stress, flexibilité cognitive, trait de personnalité, etc.) qui, *in fine*, influencent les comportements et cognitions. La place accordée à l'inconscient dans l'approche cognitiviste est une de ses caractéristiques distinctives et un autre élément en commun avec les neurosciences cognitives. Toutefois, il est important de noter le nombre croissant d'auteurs affirmant que les processus non conscients devaient jouer un rôle plus important dans la théorie des organisations au-delà de l'approche cognitiviste (Barsade, Ramarajan et Westen, 2009; Dane et Pratt, 2007; Jack et coll., 2019). Une approche de la question via le prisme des neurosciences organisationnelles apportera sans aucun doute de nouvelles perspectives à ce sujet de recherche.

En résumé, les neurosciences organisationnelles contribueront à approfondir les théories organisationnelles existantes en intégrant non seulement des connaissances issues des neurosciences, mais en offrant de nouveaux angles d'approches d'un même sujet (NO, NCS et NCO). En ce sens, il est possible d'affirmer que les neurosciences ne constituent pas une finalité, mais un angle d'approche – parmi d'autres – en management. Les neurosciences organisationnelles ouvrent de nouveaux horizons de recherches, telles que l'identification des facteurs influençant nos cognitions et comportements de façon non consciente. Elles soulèvent des questionnements qui n'auraient pas été pensés autrement. Enfin, la perspective des neurosciences organisationnelles peut aider les chercheurs à avancer – si ce n'est résoudre – certains désaccords conceptuels existants. Ainsi, le désenca斯特ement des neurosciences organisationnelles constitue un défi majeur se posant face à cette discipline. À ce jour, les neurosciences organisationnelles constituent un domaine de recherche indépendant et vertical. Le plein potentiel des neurosciences organisationnelles ne pourra être exploité qu'en s'efforçant de les intégrer horizontalement au sein des différents domaines de compétence d'une entreprise ainsi qu'aux théories organisationnelles préexistantes. La prochaine section présentera l'intérêt des travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire.

Objectif de l'étude et questions de recherche

Dans un contexte organisationnel, les employés sont en constantes interactions les uns avec les autres en personne ou bien au travers de technologie. Par ailleurs, les neurosciences organisationnelles présentent un intérêt prononcé pour ces interactions et leurs effets sur les comportements et cognitions. Cependant, elles n'ont pas été en mesure de dépasser l'échelle individuelle et tardent à intégrer la nature dynamique des interactions sociales dans leurs ensembles de connaissances. Dans le but d'approfondir notre compréhension des processus cognitifs modérant nos comportements et nos cognitions sociales, il est crucial d'étudier le fonctionnement du cerveau dans divers contextes d'interactions sociales, tels que la collaboration ou bien la compétition. *De facto*, l'hyperscanning se pose comme une méthode nécessaire à la réalisation de tels travaux, ce qui va par ailleurs démontrer l'applicabilité de l'hyperscanning au sein de neurosciences organisationnelles et ouvrir la voie à de nouvelles recherches.

Ce mémoire par articles permettra d'explorer les bases neurophysiologiques de la collaboration interindividuelle dans un contexte d'utilisation d'une technologie de l'information, ainsi que son impact sur la performance en lien avec les modulations de l'activité cérébrale des participants. Les études antérieures en neurosciences sociales et en hyperscanning permettront de structurer cette étude (Babiloni et Astolfi, 2014; Cui, Bryant et Reiss, 2012; Dumas, Nadel, Soussignan, Martinerie et Garnero, 2010; Konvalinka et coll., 2014; Labonte-Lemoyne et coll., 2016; Toppi et coll., 2016). Le contexte social dans lesquelles les participants seront placés sera manipulé afin d'imposer la collaboration, la compétition ou la réalisation autonome d'une tâche. La performance à la tâche dans chaque contexte, les modulations des bandes de fréquences – une mesure de l'activité cérébrale – et la variation de la synchronicité inter-cérébral (anglais : *Inter-Brain Synchrony* – IBS) – un index en hyperscanning – seront mesurées à l'aide de données neurophysiologiques (EEG) et de données comportementales (performance à la tâche). Les modulations des activations cérébrales seront observées en comparant chaque condition entre elles sur le plan individuel (bande de fréquence) et interindividuel (IBS). Cette étude tentera de répondre aux questions de recherche suivantes :

Existe-t-il une activation neurophysiologique spécifique à la collaboration ?

Les modulations de l'activité cérébrale sont-elles corrélées avec la performance ?

Contributions potentielles

Au sein des neurosciences une problématique s'est posée : comment passé d'un paradigme centré sur l'individu à une approche multisujet ? Cet enjeu méthodologique et technologique fut soulevé à la fin du XXe siècle et une réponse lui fut rapidement apportée : l'hyperscanning. L'hyperscanning est une méthode qui permet l'enregistrement simultané de multiples individus tout en assurant la synchronisation des enregistrements (Montague et coll., 2002). L'hyperscanning s'accompagne de méthodes d'analyse spécifiques, il ne s'agit pas seulement d'analyser les données de chaque individu indépendamment et d'émettre des hypothèses sur l'influence du contexte social sur ces dernières, mais bien d'aller extraire des informations qui ne sont perceptibles qu'au travers du prisme de l'hyperscanning. L'hyperscanning a d'abord été appliqué en IRM (Chiu et coll., 2008; Kauppi, 2010; King-Casas et coll., 2005; Li, Xiao, Houser et Montague, 2009; Montague et coll., 2002; Saito et coll., 2010; Schippers, Roebroeck, Renken, Nanetti et Keysers, 2010; Tomlin et coll., 2006) puis a été étendu aux autres méthodes de neuroimagerie (Babiloni et Astolfi, 2014). Elle a donc fait ses preuves en tant que méthode fiable pour les neurosciences sociales et bien qu'elle comporte ses propres limites (ex. coût, disponibilité et accessibilité des technologies, enjeux de synchronisation, etc.), l'hyperscanning constitue un outil de prédilection dans l'étude des interactions sociales. Pourtant les neurosciences organisationnelles y sont restées hermétiques. En effet, rares sont les travaux de recherche réalisés en neurosciences organisationnelles utilisant l'hyperscanning afin d'intégrer une vision dynamique des interactions (Mu, Cerritos et Khan, 2018).

L'objectif de ce mémoire est double. Le premier objectif est de déterminer si l'activité cérébrale associée à la réalisation d'une tâche est influencée par le contexte social dans laquelle l'individu la réalise. Ainsi, d'un point de vue théorique, ce mémoire contribue à combler les lacunes dans la littérature en neurosciences organisationnelles sur

les dynamiques des interactions interindividuelles et les fondements neurophysiologiques de la collaboration.

Le second objectif est de démontrer l'applicabilité de l'hyper-scanning autant que son potentiel dans les neurosciences organisationnelles et de franchir la barrière méthodologique que cette méthode constitue en expliquant en détail les procédures d'analyses réalisées. Se faisant, ce mémoire, d'un point de vue pratique, permettra d'ouvrir la voie au développement d'index neurophysiologiques pouvant être utilisée autant dans la recherche que dans le milieu professionnel. En effet, à l'aide des résultats de cette étude, il sera possible d'identifier des méthodes de mesures efficaces de la collaboration d'un point de vue neurophysiologique et d'envisager des applications concrètes afin d'optimiser les processus de coopération des équipes.

Structure du mémoire

Ce mémoire comporte deux articles portant sur la même expérience. Le premier article est destiné à un journal scientifique révisé par les pairs. Il rapporte les résultats finaux de la recherche, sur un échantillon de 40 participants (20 dyades) et permet d'approfondir notre compréhension des bases neurophysiologiques des interactions interindividuelles et de leurs effets sur la performance. Le deuxième article, quant à lui, est plus succinct puisque destiné à une conférence. Il a été écrit conséquemment au premier article afin de présenter et démystifier la méthode d'analyse en hyper-scanning utilisée, ainsi que de démontrer son potentiel pour les neurosciences organisationnelles. Pour conclure, le chapitre 5 reviendra sur les résultats du premier article et la méthode présentée dans le second article afin d'identifier leurs limites ainsi que de déterminer leurs contributions respectives et les futures avenues de recherche.

Informations sur les articles

Le design expérimental ainsi que la collecte de données ont été réalisés en 2014 par l'équipe du Tech3Lab. L'auteur de ce mémoire n'a pas pris part à cette partie de la recherche. L'auteur de ce mémoire a réalisé, avec le soutien d'une bourse de recherche de la fondation HEC Montréal, l'ensemble des analyses des données récoltées. Les résultats

de cette étude ont permis à l'étudiant de ce mémoire de rédiger deux articles. Le premier article est finalisé et sera bientôt envoyé pour publication. Le second article a été soumis et accepté à la conférence scientifique *Vienna Retreat on NeuroIS 2019*, à Vienne en Autriche.

Résumé du premier article

La synchronicité entre deux cerveaux est supposément associée à la collaboration entre deux individus. En effet, l'activation du cortex préfrontal et la modulation de la bande de fréquence alpha ont été largement rapportées, toutefois, encore peu de choses sont connues à propos des changements de synchronicité inter-cérébrale (IBS) survenant au cours d'une interaction sociale telle que la collaboration ou la compétition. Dans cette étude, nous investiguons les dynamiques de la variation de synchronicité inter-cérébrale afin de fournir de nouvelles informations sur la modulation de bande de fréquence sous-jacente à la collaboration. Pour ce faire, nous avons utilisé l'électroencéphalographie (EEG) pour enregistrer simultanément l'activité cérébrale de deux personnes accomplissant une tâche informatique dans quatre conditions différentes : collaboration, compétition, participation autonome et observation passive. La tâche informatique consistait en une tâche de réponse rapide (anglais : *fast-button response*). Nous avons effectué des analyses individuelles (anglais : *single subject analysis*) en plus de calculer une valeur de synchronicité inter-cérébrale pour chaque bande de fréquence, afin de comparer chaque condition sur le plan individuel et collectif. Nous avons identifié des variations significatives de la synchronicité inter-cérébrale dans la bande de fréquence alpha au niveau du cortex préfrontal chez les participants uniquement durant un épisode de collaboration. D'autres variations significatives de la synchronicité inter-cérébrale ont été observées dans la bande de fréquence thêta pour la collaboration et la compétition. La performance est corrélée aux activations individuelles (*single subject*) dans la région frontale pour les bandes de fréquences alpha et bêta.

Résumé du second article

Les chercheurs en systèmes de neuro-information (anglais : *neuro-information systems*) ont appelé au développement d'outils et de méthodes d'analyse permettant

d'évaluer l'interaction sociale en tenant compte de toutes leurs dynamiques et de leurs complexités. Les travaux récents et les avancées en hyperscanning – enregistrement simultané de plusieurs sujets – offrent la possibilité de développer de telles technologies et paradigmes de recherche répondant à ce besoin. Parmi ces techniques d'analyse, la méthode d'analyse *Wavelet Transform Coherence* (WTC) a gagné en popularité et en accessibilité au cours de la dernière décennie. Cependant, les méthodes d'hyperscanning – y compris WTC – restent difficiles à manipuler et nécessitent une préparation minutieuse compte tenu des contraintes qui s'ajoutent aux problèmes de neuroimagerie habituels. L'article suivant a pour but de donner un aperçu du domaine de l'hyperscanning et de présenter la méthode d'analyse des WTC utilisées dans ce domaine de recherche. Des exemples pratiques ainsi que des résultats de recherche sont présentés afin de saisir tout le potentiel et la complexité de cette approche innovante.

Contributions et responsabilités personnelles

Pour comprendre la contribution de l'étudiant à ce mémoire dans la rédaction des deux articles, un tableau descriptif a été élaboré (voir Tableau 1). Celui-ci identifie la contribution en pourcentage de l'étudiante pour chaque étape du processus de recherche. Il est important de tenir compte que l'étudiant a repris un projet de recherche. Ainsi, les données avaient déjà été récoltées.

Tableau 1 – Contributions dans la rédaction des articles

Étape	Contribution de l'étudiant
Revue de la littérature	Élaborer et rédiger la revue de littérature pour identifier les construits observés dans les études antérieures sur la collaboration en neurosciences et la technique de l'hyperscanning – 95 %
Conception du design expérimental	Compléter la demande au CER et les demandes de modification de projet par la suite – 30 %

	<ul style="list-style-type: none"> Le reste de l'équipe de recherche s'est assuré que toutes les demandes complétées au CER soient adéquates et les autorisations à jour. <p>Élaborer et rédiger le protocole d'expérimentation – 0 %</p> <ul style="list-style-type: none"> Le reste de l'équipe de recherche a élaboré le protocole il y a plusieurs années.
Recrutement des participants	<p>Élaborer et rédiger le questionnaire de recrutement – 0 %</p> <p>Recruter et gérer des participants – 0 %</p> <p>Administrer les compensations – 0 %</p> <ul style="list-style-type: none"> Concevoir et assembler le cartable d'expérience pour le suivi des participants – 0 %
Prétests et collecte de données	<p>Chargé des opérations lors des collectes de données – 0 %</p> <ul style="list-style-type: none"> Soutien technique et appui aux assistantes de recherche en cas d'un problème – 0 %
Extraction et transformation des données	<p>Extraction et mise en forme des données électroencéphalographie et psychométrique – 90 %</p> <ul style="list-style-type: none"> Élise Labonté-Lemoyne, coauteure des articles, a contribué à développer des scripts permettant de transformer des données brutes en données lisibles par les logiciels utilisés pour les analyses.
Analyse des données	<p>Pré-traitement des données EEG – 100 %</p> <ul style="list-style-type: none"> Développement d'un script Matlab permettant d'automatiser et standardiser le nettoyage, filtrage,

	<p>re-référencement, découpage (« <i>epoching</i> ») du signal.</p> <p>Traitement et analyse individuelle – 100 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Développement d'un script Matlab permettant d'automatiser et standardiser la transformation du signal EEG en bande de fréquences. • Développement d'un script Matlab réalisant des analyses paramétriques (ANOVA, t-test & corrélations) corrigées avec des permutations. <p>Traitement et analyse en hyperscanning – 80 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Développement d'un script Matlab réalisant des analyses de cohérence (Wavelet Transform Coherence). <p>Analyses statistiques du mémoire – 100%</p> <ul style="list-style-type: none"> • Interprétation des résultats statistiques.
Rédaction de l'article	<p>Contribution dans l'écriture des articles du mémoire – 100 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les articles ont été améliorés à l'aide des commentaires des coauteurs <p>Création des images et figures supportant graphiquement les résultats – 90%</p>

- | | |
|--|--|
| | <ul style="list-style-type: none">• Un assistant de recherche était responsable de prendre des photos de la salle d'expérimentation. L'étudiant a réalisé les autres infographies. |
|--|--|

Chapitre 2: Premier Article

Is there collaboration specific neurophysiological activation? Analysis of the brain responses in a collaboration context using EEG.¹

Paul Léné¹, Elise Labonté-Lemoyne², Alexander J. Karran², Sylvain Sénécal², Marc Fredette², Kevin J. Johnson¹, and Pierre-Majorique Léger²

¹ HEC Montréal, département de management, Montréal, Canada

² HEC Montréal, département des technologies de l'information, Montréal, Canada

Abstract

Objective: Synchrony of two different brains signals is thought to be associated to collaboration between two individuals. Indeed, prefrontal cortical activation and alpha frequency band modulation have been widely reported, but little is known about changes of interbrain synchrony (IBS) occurring during social interaction such as collaboration or competition. In this study we assess the dynamic of interbrain synchrony variation in order to provide novel insights into the frequency band modulation underlying collaboration.

Method: To address this question we used electroencephalogram (EEG) to simultaneously record brain activity of two individuals playing a computer-based game facing four different conditions: collaboration, competition, single participation and passive observation. The computer-based game consisted into a fast button response task. We calculated an IBS value for each frequency band as well as performing single subject analysis in order to compare each condition.

Results: We found significant IBS value in prefrontal cortex of participants only present during collaboration. It is associated with the modulation of alpha frequency band. Although, we observed significant IBS value in theta frequency band for both collaboration and competition along with significant single subject cortical activity. Competition is discriminable through single subject activity in several regions of the brain and frequency bands. Performance is correlated with single subject frontal activation during collaboration in the alpha and beta frequency band.

Keywords: EEG, collaboration neuroscience, social neuroscience, hyperscanning.

Highlights:

- IBS increases during collaboration in prefrontal cortex in alpha frequency band.
- IBS increases in theta band during both collaboration and competition.
- Individual beta band power in frontal cortex is correlated with performance.

¹ L'article est en préparation pour soumission au journal *Frontiers in Neuroscience*.

Introduction

Social neuroscience (SN) is defined as an interdisciplinary field devoted to the understanding of the neurophysiological and biological basis of social processes and behaviour (Cacioppo & Berntson, 1992). Within the field of SN, social interactions have been subjects of interest for the last few years. Understanding the dynamics of brain activity during human interaction has gained in importance as progress opened the door to multiple discoveries and applications such as in medicine with patients presenting social deficits (Astolfi et al., 2012; Babiloni & Astolfi, 2014; Chiu et al., 2008; Cui, Bryant, & Reiss, 2012; Piggot et al., 2004; Reiss, 2004; Watson et al., 2008), or in order to optimize team cooperation and efficiency (Schmorow & Fidopiastis, 2011; Stevens et al., 2013).

Collaboration and competition in neuroscience.

Among the social interaction of interest, collaboration is probably the most studied one. However, questions still remain about the dynamic between single cortical activation, interbrain synchrony (IBS) and performance during an episode of collaboration. Collaboration between Humans is defined as the act of working together to one end, where the success of an individual depends on the success of the another person with which the first individual is interacting in order to achieve that common goal (Mead, 2018; Wood & Gray, 1991). Meanwhile, competition between Humans is defined as the act of seeking or endeavouring to gain what another is endeavouring to gain at the same time (Mead, 2018). These interactions represent particular cases within the field of SN, considering that the related interactions are shaped by the undertaken actions (ex. Playing music vs. Working) and therefore show great variability. If Human competition has not been associated to specific brain networks, it is not the same for collaboration. Indeed, recent researches results converge toward an increase of IBS in the frontal (Astolfi et al., 2010; Babiloni et al., 2012; Burgess, 2013; Dumas et al., 2010; Konvalinka et al., 2014; Wilson, Molnar-Szakacs, & Iacoboni, 2008; Yun, Chung, & Jeong, 2008) and prefrontal areas (Astolfi et al., 2010; Babiloni et al., 2006; Cui et al., 2012; Funane et al., 2011; Labonte-Lemoyne et

al., 2016; Lindenberger et al., 2009; Schippers et al., 2010) obtained in various collaboration task context recorded using hyperscanning. In fact, it seemed that modulation of the alpha frequency band played a key role in collaboration processes (Babiloni et al., 2012; Burgess, 2013; Dikker et al., 2017; Dumas et al., 2010; Labonte-Lemoyne et al., 2016; Pérez, Carreiras, & Duñabeitia, 2017; Sinha et al., 2017; Toppi et al., 2016) as well as beta band in certain studies only (Delaherche et al., 2015; Dumas et al., 2010; Pérez et al., 2017; Sinha et al., 2017; Zhou et al., 2016). A table containing results of published and/or most cited studies using hyperscanning can be found in appendix A.

Research question.

The common track of these researches is linked to the hypothesis that collaboration is associated with frontal and prefrontal cortices activation as well as frequency bands modulations. However, it remains uncertain whether collaboration is associated with an increase of IBS correlated to an increase in collaboration performance. Although, the modulation of frequency bands across different social contexts has never been investigated given the variation of IBS to our knowledge. In this study, we replicate Cui et al. (2012) experimental protocol using EEG instead of NIRS in order to enrich our understanding of collaboration-specific brain networks. Thus, considering that modulation of the participants frequency bands will provide us an insight about participants social cognition and understanding of the interaction (Babiloni & Astolfi, 2014), we investigate the dynamic between the level of synchronicity between signals and brain oscillations.

Hypothesis.

Our hypotheses are the following: collaboration induces collaboration-specific cortical activation mostly located in frontal area within the alpha frequency band (1). IBS between participants signals increases during collaboration (2) and is correlated with performance (3).

Method

Subjects.

46 healthy participants (23 teams) with a normal vision or corrected to normal vision took part in the experiment. Out of all the participants dyad, 3 teams were retracted due to technical issues during the recording and data deemed unexploitable. Participants were at least 18 years old ($M = 26.4$, $STD = 7.21$ – 17 female). A 30\$ compensation was given to every participant following the experiment. Written informed consent was obtained from all participants, and the study protocol was approved by the IRB of our institution.

Hyperscanning.

Hyperscanning is a technique that consists in the simultaneous recording of multiple subjects and ensuring the precise synchronization of data so that recorded signals can be compared between individuals (Cui et al., 2012b; Montague et al., 2002). The development and improvement of hyperscanning offered the possibility to realize an important number of researches addressing the neurophysiological basis and dynamics of social interactions. This method was first applied to fMRI (Chiu et al., 2008; Kauppi, 2010; King-Casas et al., 2005; Li et al., 2009; Montague et al., 2002; Saito et al., 2010; Schippers et al., 2010; Tomlin et al., 2006) and was then extended to NIRS (Babiloni & Astolfi, 2014; Cui et al., 2012; Dommer et al., 2012; Funane et al., 2011; Liu et al., 2016; Scholkmann et al., 2013), MEG (Ahn et al., 2018; Zhou et al., 2016) and EEG (Astolfi et al., 2010; Babiloni et al., 2006; Dikker et al., 2017; Dumas et al., 2011; Kinreich et al., 2017; Lindenberger et al., 2009; Mu et al., 2017; Pérez et al., 2017) (see Appendix A). EEG in hyperscanning has been used to study social interaction in several contexts such as while playing music (Babiloni et al., 2012; Lindenberger et al., 2009), team dynamics (Astolfi et al., 2012; Toppi et al., 2016) or in neuroeconomy (Horat et al., 2017; Yun et al., 2008). Therefore, it is a reliable tool for SN even though EEG carries its own usual

limitations, such as great variability of source localization and connectivity estimates (Mahjoory et al., 2017; Michel et al., 2004).

Experimental Protocol.

This experimental protocol is a replication from Cui et al (2012). The experiment consists in a computer-based cooperation game divided into four conditions (Cooperation, Collaboration, Single 1 & 2) where players were seated side-by-side. The collaboration and competition conditions aim to investigate the potential cortical activation related to these specific interactions. The two single condition are only present as control condition in order to contrast the normal activation of each individual related to the task accomplishment compared to the competition or collaboration. Participants had to play on the same computer screen using the same keyboard. A splitter panel installed on the keyboard prevented them from seeing the other participant's hand (Appendix B.1). Participants were asked not to speak or move during testing; several breaks were offered for them to rest. Conditions were divided into two distinct blocks of 30 trials each, separated with a 30s resting period. The order in which the four different conditions were performed was randomized. For example, a pair of participants might complete the four tasks in the following order: Single 2, Competition, Cooperation, Single 1.

Cooperation.

A green hollow circle was presented at the beginning of each trial (Appendix B.2). After a random delay of 0.6–1.5s (uniformly distributed), the green circle was filled with a lighter green disk ('go' signal). Participants were instructed to press their respective response keys only after the 'go' signal. The participant on the left (denoted as participant #2) was instructed to use the 'z' key, and the participant on the right (denoted as participant #1) was instructed to use the '2' key. The time between the 'go' signal and the key press is denoted as the 'response time' (RT). If the difference between the RT of the two participants was smaller than a threshold (Equation 1), both participants earned one point; otherwise they both lost one point. Participants were instructed to maximize the number of points earned. Feedback screen was shown for 4s at the end of each trial displaying the total number of points accumulated. Although, retroaction indicated the

fastest responder with (+) and the slowest with a (-) green symbols on each horizontal side of the screen. Trials were separated with a 2 seconds inter-trial interval. It is noteworthy that all the information was displayed in French.

Competition.

Participants were instructed to respond faster than the other. In each trial, the participant who responded faster won a point, and the other lost a point. Participants who responded before presentation of the ‘go’ signal lost a point. In order to reduce the effectiveness of anticipatory responses, timing of ‘go’ signal onset was randomized as in the cooperation task. The feedback screen, displayed for 1.5 s, showed which player won, indicated by the word “win!” on that player’s side, and which player lost, indicated by the word “lose!” on that player’s side. The screen also showed plus and minus signs corresponding with which players were faster and slower, respectively, for consistency with the cooperation feedback screen, and the accumulative points for each participant.

Single 1 & 2.

These two last conditions were identical to the competition task, except that only one participant was responding while the other passively observed the screen. Before this task, responding participant was instructed to press his key as quickly as possible upon seeing the green circle, while the other participant was instructed to passively view the screen. The feedback screen displayed responder points. At the end of ‘Single 1’ condition, roles were exchanged so that the responder became the viewer and conversely.

Neurophysiological Measures Acquisition.

EEG data was acquired using two dense array geodesic EEG systems (EGI, Eugene, OR) with 32 electrodes each with a sampling rate of 500 Hz and the impedance of the signal has been kept below 40 kΩ. Each system had its own amplifier and acquisition computer. Participant 1’s system was designated as the master clock and participant 2’s system was enslaved to the master clock, thus reducing the synchronization

error margin to less than 2 ms. Game event markers were synchronized and imported with the use of Noldus' Observer XT and Syncbox (Noldus Information Technology, Wageningen, The Netherlands).

Data Preprocessing.

The EEG raw data were transformed into Matlab compatible file using BrainVision Analyzer 2.1.1 (Brain Products GmbH, Munich). EEG analysis were performed using Matlab® 2018A environment (Mathworks, Hyderabad, Indiana, United States) and the EEGLab Toolbox (Delorme & Makeig, 2004). The EEG signal was first down sampled to 256 Hz and the data was cleaned to remove noisy channels or data segment with the EEGLab plugin Artifact Subspace Reconstruction. A band-pass filter (1 - 100 Hz) was applied along with a 60 Hz notch filter. Blinks and muscular artifacts were removed through an ICA (Jung et al., 2000). EEG signal was re-referenced to the common average reference. The EEG activity was divided between 3 frequency bands: theta (4 Hz-7 Hz), alpha (8 Hz-12 Hz) and beta (13 Hz-30 Hz). The recordings were segmented into 3 seconds epochs starting one second before the stimulus presentation.

Data Analysis

An analysis of wavelet coherence, also known as Wavelet Transform Coherence (WTC), was conducted to assess the relationship between the EEG continuous signals from both members of a dyad for each frequency band. WTC is an analysis method measuring the cross-correlation between two-time series as a function of frequency and time (Balconi and Vanutelli, 2017; Cui et al., 2012; Torrence and Compo, 1998). It can be thought of as the local correlation between two-time series (Grinsted, Moore & Jevrejeva, 2004). The interest of such analysis is to uncover locally phase-locked phenomenon that might not be discoverable with traditional time-series analysis (Cui et al., 2012b; Grinsted et al., 2004). If this method is widely used in certain fields, it remains an infrequent analysis method for neuroscience (Addison, 2017). Nonetheless, WTC has been successfully applied in hyperscanning context with both fMRI and NIRS (Chang & Glover, 2010; Cui et al., 2012b). To perform this analysis, we used Matlab® Wavelet

Toolbox. Take note that an open access Matlab package as well as additional information about coherence analysis – particularly in NIRS – can be found on Cui's website: <http://www.alivelearn.net/?s=coherence>.

For each channel from each pair of participants in the cooperation experiment, we had three frequency bands time series (e.g. theta, alpha and beta in Fpz from participant 1 and theta, alpha and beta in Fpz from participant 2). These time series were obtained by calculating an average frequency band power value, for each band at every second of the recording. WTC analysis were performed on these two-time series (same band and channel). We determined a period interval (3.2s – 12.8s) for the task to occur (corresponding to frequency 0.3 Hz to 0.08 Hz, respectively) and calculated the average coherence value in this interval during the two blocks in each condition and during the resting period between the blocks in that same condition. “Coherence increase” is defined as the average coherence value in the two task blocks, minus the average coherence value in the central rest block (Equation 2). Then for each channel and frequency band, coherence increase value were converted to Fisher z-statistics (Chang & Glover, 2010; Cui et al., 2012b). Finally, a one-sample t-test of “coherence increase” was performed across all participant pairs, significant results are represented on appendix D ($p < 0.05$).

In addition to WTC analysis, single subject analyses were performed to compare frequency bands modulations across every condition in order to contrast the WTC results. To do so, all epochs from a given condition were averaged and frequency bands power were then calculated. Analysis of variance (ANOVA) were performed with frequency bands power as within-subject factors across all of the four conditions, paired-sample t-test were performed on significant ANOVAs as post-hoc test. In order to avoid either type I or type II error, we fixed a significance level of 5% ($\alpha = 0.05$) determined with a 10,000-iteration permutation test, for both ANOVA and paired-sample t-test.

Finally, reaction times (RTs) were defined as the duration in milliseconds between stimulus presentation and participant button response. For each condition a mean RT value was calculated. ANOVA were performed with RTs as within-subject factor across all condition. Take note that the passive condition, where one participant was only looking at the other performing the task is not included in these behavioural analyses. Performance was calculated as the number of points accumulated and converted into percentages for

each condition. Correlation analysis were performed in order to assess the relationship between performance and both coherence increase and single subject cortical activation.

Results

Our goal was to determine if collaboration was associated with specific cortical activation, more precisely, we wanted to assess the cortical activation synchrony of multiple dyads. Results showed an increase of coherence in prefrontal and left temporal cortex in alpha frequency band for collaboration only, along with increased theta activity in the occipital and parietal cortex for both collaboration and competition compared to non-social condition (Single 1 & Single 2).

Coherence Results.

As reported in appendix D, higher coherence level is found in prefrontal and left temporal cortex in alpha frequency band for collaboration only ($p < 0.05$, FDR corrected). Higher coherence level in the alpha frequency band were also observed in the competition and single 1 condition in central parietal and left parietal cortex respectively ($p < 0.05$, FDR corrected). Although, both collaboration and competition showed increased synchrony in occipital and parietal areas in the theta frequency band. More precisely, competition showed higher coherence in the central occipital cortex as well as in both left and right parietal cortex ($p < 0.05$, FDR corrected), while collaboration demonstrated higher coherence in left parietal cortex only ($p < 0.05$, FDR corrected). Single conditions did not show any coherence increase in the theta frequency band ($p > 0.05$). Enhanced levels of coherence were found in parietal areas in beta frequency band across all conditions ($p < 0.05$, FDR corrected).

All coherence results were found within the fixed period interval (3.2s – 12.8s) including the period of the trials (~7s), suggesting that coherence increase during this interval is task-related. Illustrative coherence map from a pair of subjects can be found in appendix E.

Single subject results.

Coherence increase observed in several conditions and frequency bands are interesting results. Nonetheless, do the frequency bands modulation match the observation of coherence increase from a single subject perspective? To answer this question, we compared each frequency bands power across conditions.

Results showed significant differences in all frequency bands but post-hoc test did not find any difference specific to collaboration. However, competition was determined to be significantly different from other conditions by post-hoc test ($p < 0.05$, FDR corrected). First, differences were observed in theta frequency band in frontal/frontal left and temporal left cortices ($p < 0.05$, FDR corrected). Post-hoc test confirmed that social conditions were associated with higher theta power in frontal (F7, Fz) and temporal (T8) regions ($p < 0.05$, FDR corrected). Post-hoc test also revealed that competition was different from all other conditions in frontocentral region (FCz) ($p < 0.05$, FDR corrected). Second, significant differences were found in alpha frequency band in frontal and parietal cortices ($p < 0.05$, FDR corrected). Post-hoc test confirmed that social conditions are associated with frontal left (F3) and frontal right (F8) regions activity, as well as in parietal cortex (Pz, P7, P10) ($p < 0.05$, FDR corrected). Third, significant differences in beta frequency band were found in frontal/frontal right, temporal left and parietal right regions. Post-hoc test once again confirmed differences between social conditions compared to non-social conditions in frontal (Fz, F10), temporal left (T7) and parietal right (P10) ($p < 0.05$, FDR corrected).

Behavioural results.

We compared the mean reaction times between collaboration, competition and single-active condition. We did not find any significant differences across these conditions ($p = 0.056$). Nonetheless, RTs during competition seemed to be faster than during collaboration or single-active (appendix F).

Concerning performance, correlations with coherence increase value in significant channels were not significant ($p > 0.05$) for any of the conditions. However, correlations between performance and single subject activation showed significant results in

collaboration. In fact, activity in the alpha frequency band in F4 is negatively correlated with performance ($r = -0.338$, $n = 40$, $p < 0.05$). Although, performance is also correlated with beta frequency band in Fz ($r = -0.350$, $n = 40$, $p < 0.05$), Fpz ($r = -0.484$, $n = 35$, $p < 0.01$), Fp1 ($r = -0.357$, $n = 35$, $p < 0.05$) and Fp2 ($r = -0.384$, $n = 35$, $p < 0.05$). Other conditions were not correlated with performance.

Discussion

This study aimed to replicated Cui et al (2012) experimental procedure using dual EEG recording, while assessing the dynamic of frequency bands modulations in hyperscanning. We found that coherence between dyad member's alpha band cortical activity increased during collaboration in their prefrontal cortex. Therefore, it is possible for us to accept our hypotheses 1 and 2 stating that collaboration induces collaboration-specific cortical activation mostly located in frontal area within the alpha frequency band (1) and that coherence between participants signals increases during collaboration (2). We also observed that social interaction seems to imply synchronicity of cortical activity in the theta frequency band. Considering the visuo-motor nature of the experiment, the activation in parietal and occipital cortices might be task-related. Nonetheless, the role of theta band is still an interesting observation that has already been observed, yet, rarely address (Pérez et al., 2017; Sciaraffa et al., 2017; Szymanski et al., 2017; Toppi et al., 2016). Results concerning increased coherence in the alpha band over the frontal cortex during collaboration can be attributed to higher cognitive load, as well as in the theta band over the parietal regions, which is compatible with increased resources engaged for information processing and adjustment to the partner (Klimesch, 1999). Our findings are coherent to the one from Cui et al (2012) concerning the coherence increase taking place in the frontal cortex. However, we can contrast his results by underlying the parietal and occipital coherence increase that were observed in every condition – at least in beta band. To the light of our results it can be stated that coherence does not only increase during a collaboration episode, but that collaboration requires the recruitment of prefrontal area (in alpha band to be exact). Although, contrary to Cui's work we did not find significant difference in RTs, merely a similar trend regarding somewhat faster RTs in the

competition condition. Similarly, we did not find any correlation between IBS and performance which leads us to the impossibility of rejecting the null hypothesis #3 (IBS is correlated with performance).

From a single subject perspective, we observed condition related modulations of brain oscillations. The main conclusion of these results is that social interaction can be associated with specific brain activity with higher frequency band power when compared to single condition either passive or active. Such regions are consistently activated across different specific paradigms and experiments (Babiloni & Astolfi, 2014), not only in the isolated brain of a given participant but also considering the coherence of both signals from a group of participants (Babiloni et al., 2007; Babiloni & Astolfi, 2014; Dikker et al., 2017). The presence of the activation of the prefrontal cortices in almost all of the researches to this day strongly suggests that the activity in the associative cortex contributes to social interaction (Babiloni & Astolfi, 2014; Cui et al., 2012; Toppi et al., 2015). Therefore, these observations strengthen coherence results suggesting that social interactions rely on activity over the frontal and temporal regions.

Taken altogether, these results comfort the role given to prefrontal regions in relation to social behaviour (e.g. theory of mind). More precisely, the Superior Frontal Cortex (SFC) is considered by several researches as playing a central role in theory of mind (Cui et al., 2012b; Ritter et al., 2011). Therefore, investigating certain populations such individuals with Autistic Syndrome Disorder (ASD) and compare their brain activity with the one from neurotypical participants might be a research of interest, considering that ASD is associated with deficits in theory of mind (Baron-Cohen, 2006). Other research should also investigate the dynamic of coherence increase regarding the familiarity of the dyad member as well as the nature of their relationship (e.g. professional vs. lovers). It would be interesting to question whether or not higher familiarity is associated with higher coherence during a joint task. Although, further research might also investigate the performance correlation with coherence increase, possibly by modulating the task difficulty or feedback.

The idea would be to see if by giving predetermined feedback after each trial is affecting the behaviour of participants and consequently their coherence level. Another research could be a replication of this study in a technology mediated context, where participants

are not side by side. The goal would be to assess the importance of the physical presence to the social interaction. Lastly, a more ecological task (e.g. cooperation video game) could be used to investigate the relationship between brain activity. So far, only a few researches took place in a realistic context and were all realized in flight simulation context (Astolfi et al., 2012; Toppi et al., 2016). Some early works have also been published using cooperation video game, but a lot of remains to study and understand (Labonte-Lemoyne et al., 2016). Finally, considering the growing interest in the industry for new technologies optimizing team cooperation and efficiency, method such as WTC might be a tool of interest in order to develop these technologies.

Conclusion

In summary, wavelet coherence analysis applied on EEG hyperscanning data offers a powerful tool to study social cognition in variety of context and population. It also opens a completely new field of research oriented toward the industry and the development of technologies enabling team efficiency, as well as the well-being of patients presenting social deficits.

Acknowledgements

We thank the staff and in particular the research assistants at the Tech3Lab from HEC Montréal for their support and devotion. All the time, passion and hard work from the operational team who faced technological challenges to make this hyperscanning experiment a reality.

Financial disclosure

This research is supported by a Natural Sciences and Engineering Research Council discovery grant (NSERC/CRSNG - #435591-2013). The funders had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

Competing interest

The authors assert that they have no competing interests.

References

- Addison, P. S. (2017). *The illustrated wavelet transform handbook: introductory theory and applications in science, engineering, medicine and finance*. CRC press.
- Astolfi, L., Cincotti, F., Mattia, D., De Vico Fallani, F., Salinari, S., Vecchiato, G., ... Babiloni, F. (2010). Imaging the social brain: Multi-subjects EEG recordings during the "Chicken's game". *2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC 2010*, 1734–1737. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2010.5626708>
- Astolfi, L., Toppi, J., Borghini, G., Vecchiato, G., He, E. J., Roy, A., ... Babiloni, F. (2012). Cortical activity and functional hyperconnectivity by simultaneous EEG recordings from interacting couples of professional pilots. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, 4752–4755. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2012.6347029>
- Astolfi, L., Toppi, J., De Vico Fallani, F., Vecchiato, G., Salinari, S., Mattia, D., ... Babiloni, F. (2010). Neuroelectrical hyperscanning measures simultaneous brain activity in humans. *Brain Topography*, 23(3), 243–256. <https://doi.org/10.1007/s10548-010-0147-9>
- Babiloni, C., Buffo, P., Vecchio, F., Marzano, N., Del Percio, C., Spada, D., ... Perani, D. (2012). Brains “in concert”: Frontal oscillatory alpha rhythms and empathy in professional musicians. *NeuroImage*, 60(1), 105–116. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.12.008>
- Babiloni, F., & Astolfi, L. (2014). Social neuroscience and hyperscanning techniques: Past, present and future. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 44, 76–93. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2012.07.006>
- Babiloni, F., Cincotti, F., Mattia, D., Mattiocco, M., De Fallani, F. V., Tocci, A., ... Astolfi, L. (2006). Hypermethods for EEG hyperscanning. *Annual International*

- Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology - Proceedings*, 3666–3669. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2006.260754>
- Balconi, M., & Vanutelli, M. E. (2017). Cooperation and Competition with Hyperscanning Methods: Review and Future Application to Emotion Domain. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 11(September), 1–6. <https://doi.org/10.3389/fncom.2017.00086>
- Baron-Cohen, S. (2006). The hyper-systemizing, assortative mating theory of autism. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 30(5), 865–872. <https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2006.01.010>
- Burgess, A. P. (2013). On the interpretation of synchronization in EEG hyperscanning studies: a cautionary note. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(December), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00881>
- Cacioppo, J. T., & Berntson, G. (1992). Social Psychological Contributions To the Decade of the Brain.Pdf. *American Psychologist*, 47(8), 1019–1028.
- Chang, C., & Glover, G. H. (2010). Time--frequency dynamics of resting-state brain connectivity measured with fMRI. *Neuroimage*, 50(1), 81–98.
- Chiu, P. H., Kayali, M. A., Kishida, K. T., Tomlin, D., Klinger, L. G., Klinger, M. R., & Montague, P. R. (2008). Self Responses along Cingulate Cortex Reveal Quantitative Neural Phenotype for High-Functioning Autism. *Neuron*, 57(3), 463–473. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.12.020>
- Cui, X., Bryant, D. M., & Reiss, A. L. (2012). NIRS-based hyperscanning reveals increased interpersonal coherence in superior frontal cortex during cooperation. *NeuroImage*, 59(3), 2430–2437. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.09.003>
- Delaherche, E., Dumas, G., Nadel, J., & Chetouani, M. (2015). Automatic measure of imitation during social interaction: A behavioral and hyperscanning-EEG benchmark. *Pattern Recognition Letters*, 66, 118–126. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2014.09.002>
- Delorme, A., & Makeig, S. (2004). EEGLAB: an open sorce toolbox for analysis of single-trail EEG dynamics including independent component anlaysis. *Journal of Neuroscience Methods*, 134, 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2003.10.009>
- Dikker, S., Wan, L., Davidesco, I., Kaggen, L., Oostrik, M., McClintock, J., ... Poeppel,

- D. (2017). Brain-to-Brain Synchrony Tracks Real-World Dynamic Group Interactions in the Classroom. *Current Biology*, 27(9), 1375–1380. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.04.002>
- Dommer, L., Jäger, N., Scholkmann, F., Wolf, M., & Holper, L. (2012). Between-brain coherence during joint n-back task performance: A two-person functional near-infrared spectroscopy study. *Behavioural Brain Research*, 234(2), 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2012.06.024>
- Dumas, G., Lachat, F., Martinerie, J., Nadel, J., & George, N. (2011). From social behaviour to brain synchronization: Review and perspectives in hyperscanning. *IRBM*, 32(1), 48–53. <https://doi.org/10.1016/j.irbm.2011.01.002>
- Dumas, G., Nadel, J., Soussignan, R., Martinerie, J., & Garnero, L. (2010). Inter-brain synchronization during social interaction. *PloS One*, 5(8), e12166.
- Funane, T., Kiguchi, M., Atsumori, H., Sato, H., Kubota, K., & Koizumi, H. (2011). Synchronous activity of two people's prefrontal cortices during a cooperative task measured by simultaneous near-infrared spectroscopy. *Journal of Biomedical Optics*, 16(7), 077011. <https://doi.org/10.1117/1.3602853>
- Grinsted, A., Moore, J. C., & Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11(5/6), 561–566.
- Jung, T.-P., Makeig, S., Humphries, C., Lee, T.-W., McKeown, M. J., Iragui, V., & Sejnowski, T. J. (2000). Removing electroencephalographic artifacts by blind source separation. *Psychophysiology*, 37(2), 163–178.
- Kauppi. (2010). Inter-subject correlation of brain hemodynamic responses during watching a movie: localization in space and frequency. *Frontiers in Neuroinformatics*, 4(March), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fninf.2010.00005>
- King-Casas, B., Tomlin, D., Anen, C., Camerer, C. F., Quartz, S. R., & Montague, P. R. (2005). Getting to Know You: Reputations and Trust in a Two-Person Economic Exchange. *Science*, 308(5718), 78–83. <https://doi.org/10.1126/science.1108062>
- Kinreich, S., Djalovski, A., Kraus, L., Louzoun, Y., & Feldman, R. (2017). Brain-to-Brain Synchrony during Naturalistic Social Interactions. *Scientific Reports*, 7(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17339-5>

- Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Research Reviews*, 29(2–3), 169–195.
- Konvalinka, I., Bauer, M., Stahlhut, C., Hansen, L. K., Roepstorff, A., & Frith, C. D. (2014). Frontal alpha oscillations distinguish leaders from followers: Multivariate decoding of mutually interacting brains. *NeuroImage*, 94, 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.03.003>
- Labonte-Lemoyne, E. (2016). Are We in Flow ? Neurophysiological Correlates of Flow States in a. *CHI Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 1980–1988. <https://doi.org/10.1145/2851581.2892356>
- Li, J., Xiao, E., Houser, D., & Montague, P. R. (2009). Neural responses to sanction threats in two-party economic exchange. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(39), 16835–16840. <https://doi.org/10.1073/pnas.0908855106>
- Lindenberger, U., Li, S. C., Gruber, W., & Müller, V. (2009). Brains swinging in concert: Cortical phase synchronization while playing guitar. *BMC Neuroscience*, 10, 1–12. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-10-22>
- Liu, N., Mok, C., Witt, E. E., Pradhan, A. H., Chen, J. E., & Reiss, A. L. (2016). NIRS-Based Hyperscanning Reveals Inter-brain Neural Synchronization during Cooperative Jenga Game with Face-to-Face Communication. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10(March), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00082>
- Mahjoory, K., Nikulin, V. V., Botrel, L., Linkenkaer-Hansen, K., Fato, M. M., & Haufe, S. (2017). Consistency of EEG source localization and connectivity estimates. *NeuroImage*, 152, 590–601. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.02.076>
- Mead, M. (2018). *Cooperation and competition among primitive peoples*. Routledge.
- Michel, C. M., Murray, M. M., Lantz, G., Gonzalez, S., Spinelli, L., & de Peralta, R. G. (2004). EEG source imaging. *Clinical Neurophysiology*, 115(10), 2195–2222.
- Montague, P. R., Berns, G. S., Cohen, J. D., McClure, S. M., Pagnoni, G., Dhamala, M., ... Fisher, R. E. (2002). Hyperscanning: Simultaneous fMRI during linked social interactions. *NeuroImage*, 16(4), 1159–1164. <https://doi.org/10.1006/nimg.2002.1150>
- Mu, Y., Han, S., & Gelfand, M. J. (2017). The role of gamma interbrain synchrony in

- social coordination when humans face territorial threats. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 12(10), 1614–1623. <https://doi.org/10.1093/scan/nsx093>
- Pérez, A., Carreiras, M., & Duñabeitia, J. A. (2017). Brain-To-brain entrainment: EEG interbrain synchronization while speaking and listening. *Scientific Reports*, 7(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04464-4>
- Piggot, J., Kwon, H., Mobbs, D., Blasey, C., Lotspeich, L., Menon, V., ... Reiss, A. L. (2004). Emotional attribution in high-functioning individuals with autistic spectrum disorder: A functional imaging study. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 43(4), 473–480. <https://doi.org/10.1097/01.chi.0000111363.94169.37>
- Reiss, A. L. (2004). An Experiment of Nature: Brain Anatomy Parallels Cognition and Behavior in Williams Syndrome. *Journal of Neuroscience*, 24(21), 5009–5015. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5272-03.2004>
- Ritter, K., Dziobek, I., Preißler, S., Rüter, A., Vater, A., Fydrich, T., ... Roepke, S. (2011). Lack of empathy in patients with narcissistic personality disorder. *Psychiatry Research*, 187(1–2), 241–247.
- Saito, D. N., Tanabe, H. C., Izuma, K., Hayashi, M. J., Morito, Y., Komeda, H., ... Sadato, N. (2010). “Stay Tuned”: Inter-Individual Neural Synchronization During Mutual Gaze and Joint Attention. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 4(November), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fnint.2010.00127>
- Schippers, M., Roebroeck, A., Renken, R., Nanetti, L., & Keysers, C. (2010). Mapping the information flow from one brain to another during gestural communication. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107, 9388–9393. <https://doi.org/10.1073/pnas.1001791107/-/DCSupplemental.www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1001791107>
- Schmorow, D. D., & Fidopiastis, C. M. (2011). *Foundations of Augmented Cognition. Directing the Future of Adaptive Systems: 6th International Conference, FAC 2011, Held as Part of HCI International 2011, Orlando, FL, USA, July 9-14, 2011, Proceedings* (Vol. 6780). Springer Science & Business Media.
- Scholkmann, F., Holper, L., Wolf, U., & Wolf, M. (2013). A new methodical approach in neuroscience: assessing inter-personal brain coupling using functional near-infrared

- imaging (fNIRI) hyperscanning. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(November), 1–6. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00813>
- Sinha, N., Maszczyk, T., Zhang, W., Tan, J., & Dauwels, J. (2017). EEG hyperscanning study of inter-brain synchrony during cooperative and competitive interaction. *2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2016 - Conference Proceedings*, 4813–4818. <https://doi.org/10.1109/SMC.2016.7844990>
- Stevens, R., Galloway, T., Wang, P., Berka, C., Tan, V., Wohlgemuth, T., ... Buckles, R. (2013). Modeling the neurodynamic complexity of submarine navigation teams. *Computational and Mathematical Organization Theory*, 19(3), 346–369.
- Szymanski, C., Pesquita, A., Brennan, A. A., Perdikis, D., Enns, J. T., Brick, T. R., ... Lindenberger, U. (2017). Teams on the same wavelength perform better: Inter-brain phase synchronization constitutes a neural substrate for social facilitation. *NeuroImage*, 152(March), 425–436. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.03.013>
- Tomlin, D., Amin Kayali, M., King-Casas, B., Anen, C., Camerer, C. F., Quartz, S. R., & Read Montague, P. (2006a). Agent-Specific Responses in the Cingulate Cortex During Economic Exchanges. *Science*, 312(May), 1047–1050. Retrieved from <http://science.sciencemag.org/>
- Toppi, J., Borghini, G., Petti, M., He, E. J., De Giusti, V., He, B., ... Babiloni, F. (2016). Investigating cooperative behavior in ecological settings: An EEG hyperscanning study. *PLoS ONE*, 11(4), 1–26. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154236>
- Toppi, J., Member, E., Ciaramidaro, A., Vogel, P., Mattia, D., Member, F. B. E., & Member, L. A. E. (2015). Graph Theory in Brain - to - Brain Connectivity : a Simulation Study and an Application to an EEG hyperscanning experiment. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 2211–2214. <https://doi.org/10.1109/TBME.2015.7318830>
- Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1), 61–78.
- Watson, C., Hoeft, F., Garrett, A. S., Hall, S. S., & Reiss, A. L. (2008). Aberrant brain activation during gaze processing in boys with fragile X syndrome. *Archives of General Psychiatry*, 65(11), 1315–1323.

<https://doi.org/10.1001/archpsyc.65.11.1315>

- Wilson, S. M., Molnar-Szakacs, I., & Iacoboni, M. (2008). Beyond superior temporal cortex: Intersubject correlations in narrative speech comprehension. *Cerebral Cortex, 18*(1), 230–242. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhm049>
- Wood, D. J., & Gray, B. (1991). Toward a comprehensive theory of collaboration. *The Journal of Applied Behavioral Science, 27*(2), 139–162.
- Yun, K., Chung, D., & Jeong, J. (2008). Emotional Interaction in Human Decision Making using EEG Hyperscanning. *Proceedings of the 6th International Conference on Cognitive Science, 2*, 1–4.
- Zhou, G., Bourguignon, M., Parkkonen, L., & Hari, R. (2016). Neural signatures of hand kinematics in leaders vs. followers: A dual-MEG study. *NeuroImage, 125*, 731–738.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.11.002>

Appendix A – Literature Table

Table 1. List of the analyzed studies performed with hyperscanning methodologies (from the most recent to the oldest). A similar table gathering researches realized before 2013 can be found in Babiloni et al. (2014).

Research area	Authors, Journal, Year	Task Instructions	Number of subjects	Subjects		Results
				x	Method	
Turn-Taking Verbal Interaction	Ahn et al., 2018 – Human Brain Mapping	Number counting, speaking and listening.	10	2 x EEG / MEG	Alpha and Gamma oscillations with EEG and MEG in multiple regions followed by a phase synchronization between brain (phase lag index).	
Brain-to-Brain Synchrony	Dikker et al., 2017 – Current biology	Group Interactions in Classroom	12	12 x EEG	Reduction of participants' alpha oscillation followed by an increase in alpha synchrony between participants. Higher interpersonal students had a higher IBS. External factors played a role on IBS (ex. Teaching style).	

Neuroeconomy	Horat et al., 2017 – Frontiers in Integrative Neurosciences	Ultimatum Game	20	2 x EEG	Modulation of ERPs (P2, FRN, LPC and N2) depending on the role played and the outcome of the trial.
Social neuroscience	Kinreich et al. 2017 - Scientific Reports	Naturalistic social interaction	104	2 x EEG	IBS increased during social contact (eye contact, speech, etc.) and enhanced Gamma band (parietal and temporal). The results were stronger for real couples when compared to strangers' dyad.
Social neurosciences	Mu et al., 2017 – Social Cognitive and Affective Neuroscience	Article reading (threatening article) and time counting.	90	2 x EEG	IBS of gamma band oscillations is enhanced when people are under high threat, which comes with lower dyadic interpersonal time lag (i.e. higher coordination).
Brain-to-Brain synchrony	Pérez et al., 2017 – Scientific Reports	Naturalistic social interaction	30	2 x EEG	Inter-brain synchronization was enhanced for Delta, Theta, Alpha and Beta frequency bands between dyads. The different frequency band are

						affected differently depending on the condition (listener/speaker).
Environment perception and evaluation	Sciaraffa et al., 2017 – Brain Sciences	Flight Simulator – NASA MATB	10	2 x EEG	Significant variations in frontal Theta and overall Alpha band were found between participants, they are associated with mental workload. Mental workload is affected by the difficulty of the task. Higher workload begets less efficient coordination as participants focused on their respective task.	
Brain-to-Brain synchrony	Szymanski et al. 2017 - NeuroImage	Visual Search Task	52	2 x EEG	IBS enhancement in frontoparietal Delta and Theta band during collaboration when compared to individual condition.	
Brain-to-Brain synchrony	Sinha et al., 2017 - 2016 IEEE International Conference on	Pong Game	24	2 x EEG	IBS significantly enhanced in Alpha and Beta band. Only cooperation elicited significant activation - not competition. Higher IBS during collaboration than competition.	

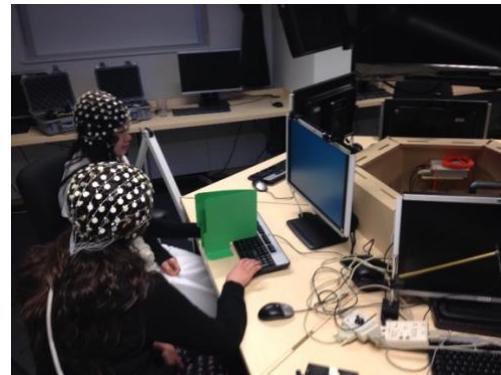
	Systems, Man, and Cybernetics				
Neuro- management	Labonté-Lemoyne et al., 2016 - CHI	Role-Play of different management style Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems	42	2 x EEG	Alpha band in right frontal region changes depending of the flow state of the participant. Flow induced more alpha activation. Players in boredom state were significantly paired with high alpha partners.
Neuro- management	Toppi et al., 2016 – PLoS One	Flight Simulator	12	2 x EEG	Significantly higher Interbrain Synchrony between real pilot couple instead of new teamed pilot. Significant Theta band activation, only trend with Alpha. Higher collaboration phase induced higher activation in Theta and Alpha band significantly. The leader (FO - Flight Operator) has significant solo activation in frontal, parietal and occipital area during certain phases

					(take-off and landing), as he engages more resources during these periods.
Imitation and perception	Zhou et al., 2016 – NeuroImage	Imitation of hand movements	16	2 x MEG	Alpha and Beta modulation in sensorimotor cortices. In occipital region Beta modulation was stronger for leader than followers. The modulation is significantly caused by the role of the participant.
Neuro-management	Sciaraffa et al., 2015 - Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society	NASA Flight Simulator – MATB-II	8	2 x EEG	Hyper-connections were increased in the frontal area of the pilot and in the parietal and central area during the hard condition of the co-pilot.
Environment perception and evaluation	Delaherche et al., 2015 – Pattern	Imitation of hand movements	5	2 x EEG	Significant difference in alpha, beta 1 and 2 and also gamma but only between imitation vs. non-imitation

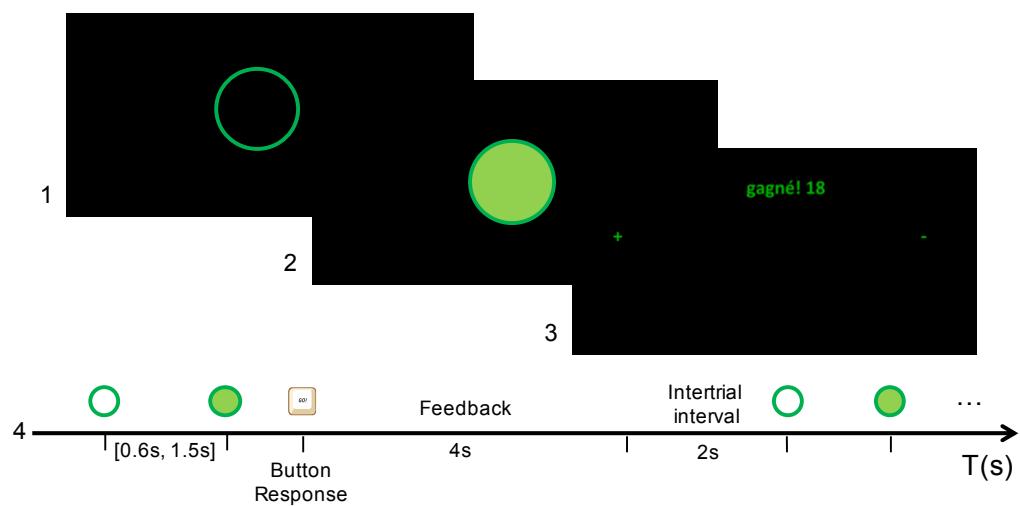
	Recognition Letters				condition were found between participants.
Imitation and perception	Konvalinka et al., 2014 - NeuroImage	Synchronized Finger Tapping	18	2 x EEG	Asymmetric patterns of the frontal alpha-suppression in each pair, during anticipation and execution task, such that only one member showed the frontal component. Analysis of the behavioural data showed that this distinction coincided with the leader–follower relationship in 8/9 pairs, with the leaders characterized by the stronger frontal alpha-suppression. This suggests that leaders invest more resources in prospective planning and control.

Appendix B – Experiment information

B1. Experimental setup. A pair of participants demonstrates the experimental setup. Participants facing screen with the splitter panel on the keyboard preventing them from seeing each other hand movements.



B2. Task flow of the cooperation experiment. (1) Screenshot of the ready signal. (2) Screenshot of the “go” signal indicating participants to press their assign button. (3) Feedback window for a given trial. The word “gagné” means “win” in French. (4) Timeline represents the time flow of the experiment, showing two consecutive trials. The different conditions were divided into two 30-trial blocks separated by 30 seconds resting period.



Appendix C – Equation

Equation 1. Reaction Times Threshold. S is the threshold – R1 and R2 are the reaction times of the participants 1 and 2. The parameter 1/8 was chosen so that the task achieved a reasonable level of difficulty.

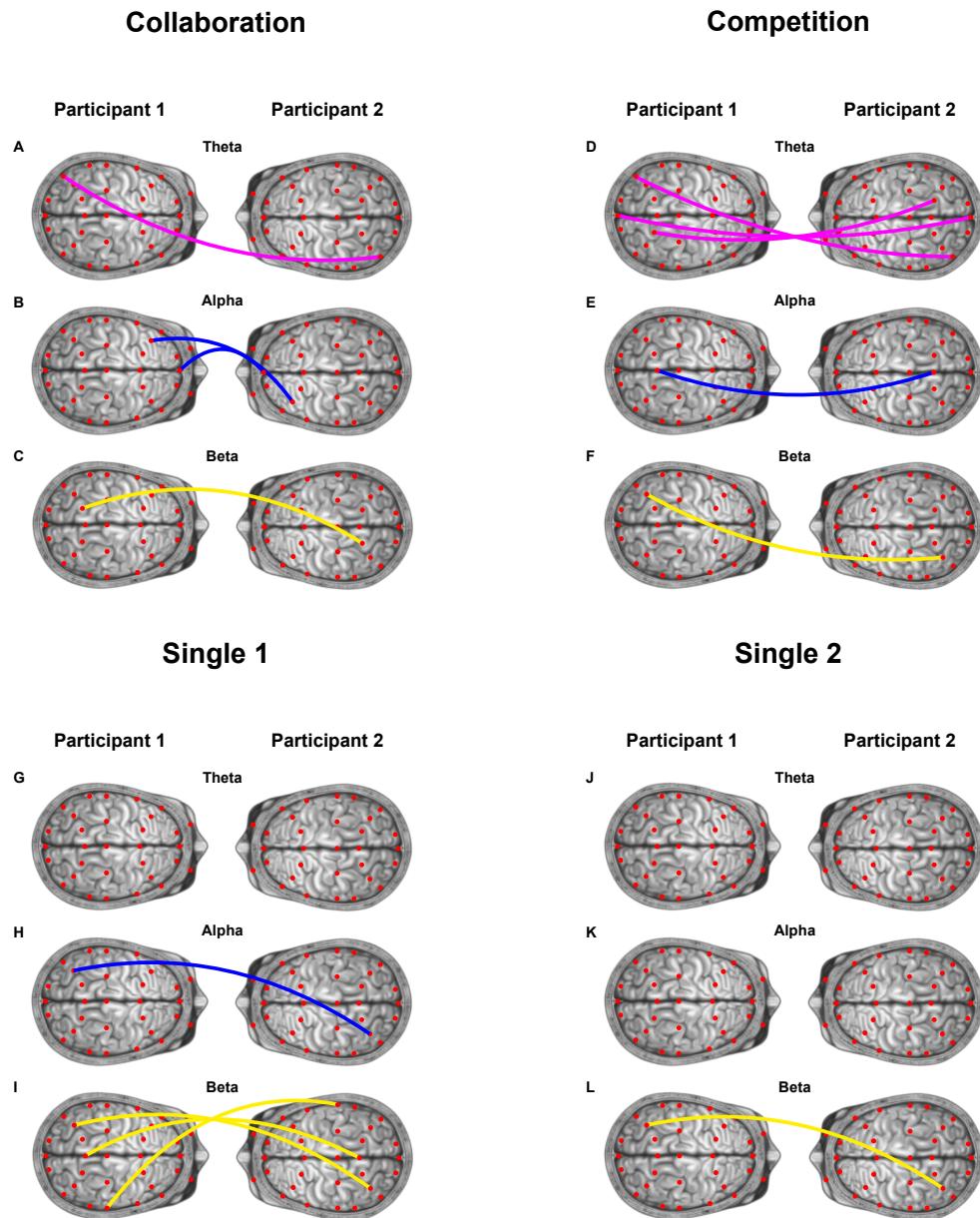
$$S = 1/8(R1 + R2)$$

Equation 2. Inter-Brain Synchrony Index. IBS is the mean coherence value – IBS_{block_1} and IBS_{block_2} are the coherence value for blocks 1 and 2. IBS_{rest} is the coherence value during the resting period.

$$IBS = 1/2(IBS_{block_1} + IBS_{block_2}) - IBS_{rest}$$

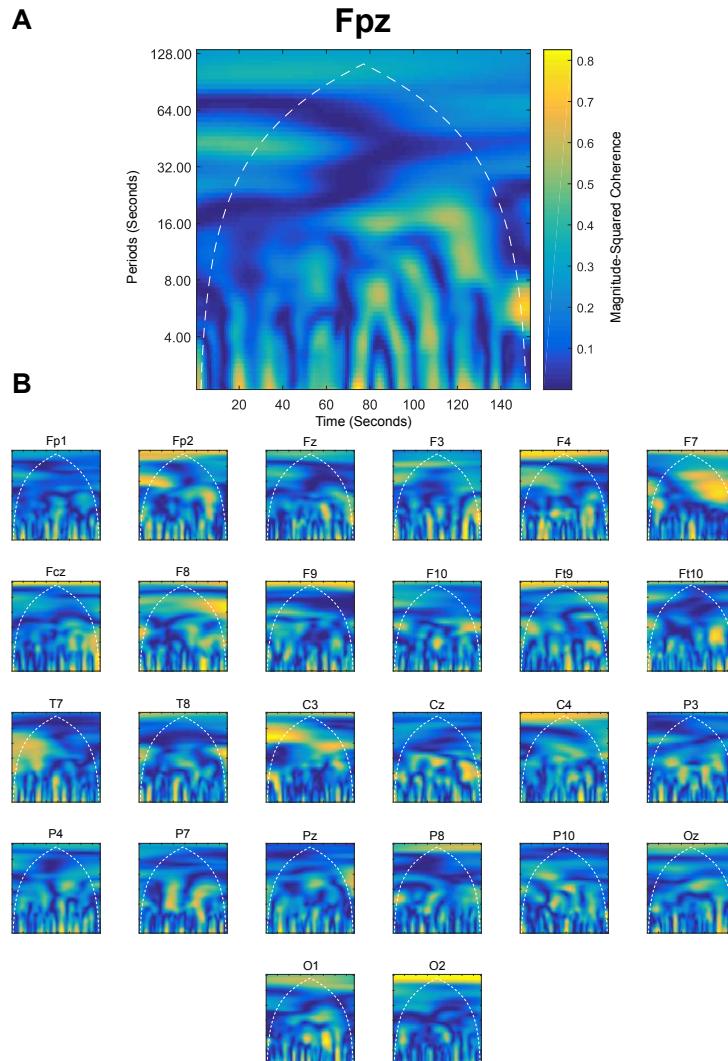
Appendix D – Wavelet Coherence Results

Topographic Representation of Coherence Results. Connections represent significant level of coherence between the two participants ($p < 0.05$). Each color is associated with a frequency band: purple – theta, blue – alpha, yellow – beta.



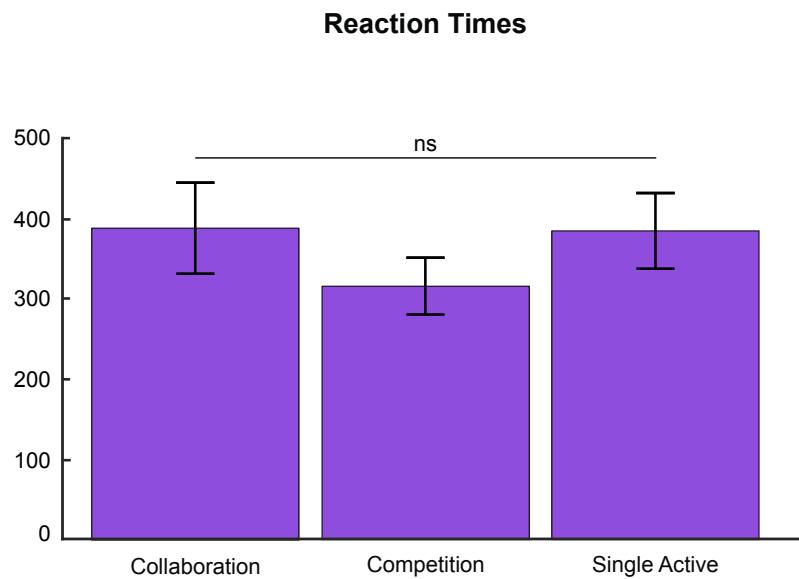
Appendix E – Coherence Map

A. Coherence Map in Fpz. Wavelet coherence (WTC) between the alpha band signal in Fpz channel from the 1st participant and the alpha band signal from Fpz channel from the 2nd participant in an illustrative participant pair (dyad #1). The horizontal axis represents the time of the experimental task and the vertical axis represents the period (s) of wavelets – the intervals at which synchronicity is potentially observed. The reason the horizontal axis is in second instead of millisecond is due to the fact that the wavelet coherence analysis was performed on frequency band epochs, each of them representing the mean band power for one second. **B. Coherence Map in all channels.** Wavelet coherence in alpha band for all channels in participant dyad #1.



Appendix F – Reaction times comparison

Reaction Times Comparison. The reaction times between the different condition were not significant. Reaction times during competition appear to be faster than both collaboration or single active conditions.



Chapitre 3: Deuxième Article

Wavelet Transform Coherence: An Innovative Method to Investigate Social Interaction in NeuroIS²

Paul Léné¹, Alexander J. Karran², Elise Labonté-Lemoyne², Sylvain Sénécal², Marc Fredette², Kevin J. Johnson¹, and Pierre-Majorique Léger²

¹HEC Montréal, département de management, Montréal, Canada
`{paul.lene, kevin.johnson}@hec.ca`

²HEC Montréal, département des technologies de l'information, Montréal, Canada
`{alexander-john.karran, elise.labonte-lemoigne, sylvain.senecal, marc.fredette, pierre-majorique.leger}@hec.ca`

Abstract. Neuro-information system researchers called for the development of tools and methods of analysis that allows for the assessment of social interactions that considers the full range of dynamics and complexities. Recent work and progress in hyperscanning – the simultaneous recording of multiple subjects – offers the possibility to develop such methods and new research paradigms to respond to that need. Among these methods, Wavelet Transform Coherence (WTC) analysis is gaining in popularity and accessibility. However, hyperscanning methods – including WTC – remain a challenging experimental paradigm and analysis method, requiring careful preparation of data and consideration of the constraints of each neuroimaging technique. This manuscript aims to introduce the Wavelet Transform Coherence method of analysis as an innovative approach to Neuro-Information Systems research. We present practical examples and results in order to highlight the potential and complexity of this approach.

Keywords: EEG • Neuro-Information System • Social Neuroscience • Hyperscanning • Wavelet Transform Coherence • Wavelet Analysis.

² L'article est en processus de publication dans le cadre de *NeuroIS Vienna Retreat 2019*.

Introduction

In the past decade, researchers from social and cognitive neuroscience displayed a growing interest in the exploration and understanding of social interactions and their associated brain networks [1]. A recent review [2] outlined the breadth and depth of this type of research showing that a growing number of more recent studies utilized hyperscanning as a breakthrough experimental paradigm. Hyperscanning is a neuroimaging technique that consists of the simultaneous recording of multiple subjects in parallel and ensures the precise synchronization of data so that recorded signals can be compared and contrasted between individuals [3]. The development, improvement and utilization of hyperscanning have allowed a number of significant contributions in various fields of research which address the neurophysiological basis and dynamics of social interactions, such as in a context of neuroeconomy, sociology and team coordination [1], [3,4,5,6,7].

In parallel with the development of hyperscanning, a growing interest in neuroimaging tools and methods from the domain of information technology and more specifically neuro-information system (NeuroIS) was observed [8,9]. Calls for research and early work were made concerning topics such as collaboration, flow, trust and digital interaction [8], [10,11,12,13]. Since hyperscanning allows the recording of multiple subjects with precise synchronization of their signals while performing tasks involving information systems, it appears timely to combine the progress in hyperscanning with the growth of NeuroIS. The goal of this paper is to introduce the Wavelet Transform Coherence method of analysis and to demonstrate the exciting potential that it represents for NeuroIS research.

Hyperscanning Methods

The hyperscanning methodology can be applied using any neuroimaging tool. From the standpoint of an experimental paradigm, hyperscanning "only" consists of the simultaneous recording of multiple subjects which considers two brains as a "two-in-one" system such as in the case of teamwork using information systems to complete a task. Critically this paradigm creates several factors that require consideration, the first of which is how to calculate the correlation between neuroimaging data acquired from two

or more individuals. Secondly is equipment availability, having access to multiple recording devices at the same time (e.g., 2 MRIs in one place is rare) can prove problematic. The final factors to be considered are risk and cost, there are costs associated with imaging equipment and participant recruitment and then there is the risk associated with data loss, to lose one or more participants data is to lose either fidelity of signal (in the case of multiple participants) or complete loss during analysis (in the case of 2 participants). These factors are discussed in detail in the literature through extensive reviews (see Babiloni et al. (2014) and Mu et al. (2018)). However, as previously discussed, the primary critical factor associated with hyperscanning and one that is most frequently underestimated in hyperscanning lies in the analysis process.

Within the last decade, different types of hyperscanning methods of analysis have been developed, such as the Phase Lag Index [15] which can be applied to EEG or MEG data. Most approaches are specific to a given neuroimaging tool due to the data produced and nature of effect under observation (e.g., NIRS – blood flow). This variety of methods offers various approaches to analysing a unique phenomenon. However, the interpretation of results will differ significantly depending on the neuroimaging tool and method of analysis that is used. Therefore, a new analysis method for hyperscanning data that is not specific to any tool may benefit researchers in the field of NeuroIS.

Recently, wavelet transform coherence (WTC) [4, 16] has been adapted for use in the neurosciences. The WTC method was used initially in the field of meteorology in the early 1990s [17] to study the EL-Nino-Southern Oscillation. It has since been successfully adapted for neuroscience as a method of study the time-frequency dynamics of resting-state brain activity using fMRI [18] and has since gained popularity in hyperscanning research [4], [19]. The following section will present a broad outline of the WTC analysis method.

Wavelet Transform Coherence

WTC is a method of analysis that measures the cross-correlation between two signals as a function of frequency and time [17]. It calculates the localized coherence coefficient as a value between 0 and 1. Mapping this coherence value uncovers inter-signal phenomenon that might not be discoverable through traditional time-series analysis [4], [16]. Figure 1 shows a practical example which highlights the difference between

individual and WTC data visualization. Shown in blue and red (Figure 1A) is a NIRS trace of two participants performing an information systems task. From this, no discernable synchronous pattern between the two signals can be seen. However, when WTC is applied to the same data, it generates a coherence heat map (Figure 1B) showing the coherence coefficient. In this plot, yellow areas represent a high degree of correlation between the two signals (coherence coefficient ≥ 1), and blue areas represent the absence of synchronicity of the two signals (coherence coefficient = 0). The WTC output suggests that the highest coherence between the brain signals occurring within the 60 second period, which indicates that participants are performing very similar actions at similar points in time and utilizing similar amounts of cognitive effort. The thick yellow bar visible at 1s period is an artefact associated with heart rate. This example highlights the difference in analysis and interpretation presented by WTC when compared to traditional trace plots.

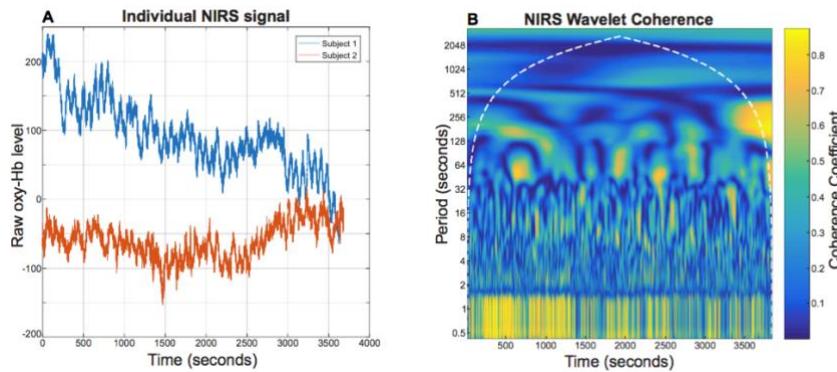


Figure 1(A). Individual NIRS Signal. The horizontal axis represents the time of the experimental task and the vertical axis represents the oxygenated hemoglobin level for two subjects. (B). Wavelet Transform Coherence. The horizontal axis represents the time of the experimental task and the vertical axis represents the period (s) of wavelets – the intervals at which synchronicity is potentially observed.

The fact that WTC is a neuroimaging-tool agnostic analysis method makes it highly appealing as a means for replicating or adding value to studies that utilized a variety of neuroimaging tools, potentially providing additional rigour and insight to already completed work that involved one or more participants working in parallel. WTC as an analytical approach is gaining in popularity through increased accessibility and standardization, with many research teams developing open access code and toolboxes for use. For the examples shown in this manuscript, we utilized the Matlab® Wavelet Toolbox (4.1.9, MathWorks Inc, Natick MA).

Illustrative Research

To further illustrate the utility of WTC, we present comparative research that replicates the work of Cui et al. (2012) who utilized NIRS to simultaneously measure brain activity in two people while they played a computer-based cooperation game side by side and investigate inter-brain activity coherence. In our study, we investigate the neurophysiological basis of cooperative task completion using EEG and apply the WTC method to interpret the hyperscanning dynamics (under review). The following section presents a summary of our results presented as an example of the holistic representation that single subject results associated with the insight from WTC offers. The experiment consisted of two subjects, sited side by side, performing an IT task (fast-button response) with a period of approximately 7s. In one condition subjects were instructed to be as fast as possible (competition) and in another condition instructed to synchronize clicks as much as possible with the second participant (collaboration); a third control condition was introduced – in which one subject performs the task while the other passively observes and inversely. Each condition was composed of two blocks with a resting period of 30s. EEG data were treated using Matlab® 2018A environment (Mathworks, Hyderabad, India, United States) and the EEGLab Toolbox (Delorme & Makeig, 2004). The EEG signal was filtered to remove noisy channels or data segments using the EEGLab artefact subspace reconstruction. A band-pass filter (1 - 100 Hz) was applied along with a 60 Hz notch filter. Blinks and muscular artefacts were removed through an ICA (Jung et al., 2000). EEG signal was re-referenced to the common average reference. The EEG signal was then divided into frequency bands: theta (4 Hz-7 Hz), alpha (8 Hz-12 Hz) and beta (13 Hz-30 Hz). The recordings were segmented into 3 seconds epochs starting one second before the stimulus presentation. We performed both single subject and WTC analysis.

Through analysis of single-subject data, we observed significant modulations of brain wave activity for each condition. From this, we concluded that the social conditions (competition and collaboration) could be associated with specific brain activity located primarily in the frontal cortex with higher frequency band power when compared to single conditions. More precisely, competition and collaboration showed significant differences in frontal and prefrontal regions within all frequency bands. This result is in line with results reported by Cui et al. in their earlier study.

However, when WTC was applied to those same data the results showed that coherence between dyad member's alpha band cortical activity increased in their prefrontal cortex only during the collaboration condition (As visible in Figure 2A with the coherence appearing around 7s corresponding to the task period). We also observed that social conditions appeared to highlight a synchronicity of cortical activity in the theta frequency band. Results showing increased coherence in the alpha band over the frontal cortex during collaboration can potentially be attributed to either higher cognitive load or inhibition, and this coupled with activity in the theta band over the parietal regions, is compatible with the hypothesis of an increased cognitive resource demand required for information processing and adjustments to the partner [20]. Brain activity in the other experimental conditions demonstrated significant synchronicity over occipital and parietal regions that are possibly task-related. However, this inference is under investigation.

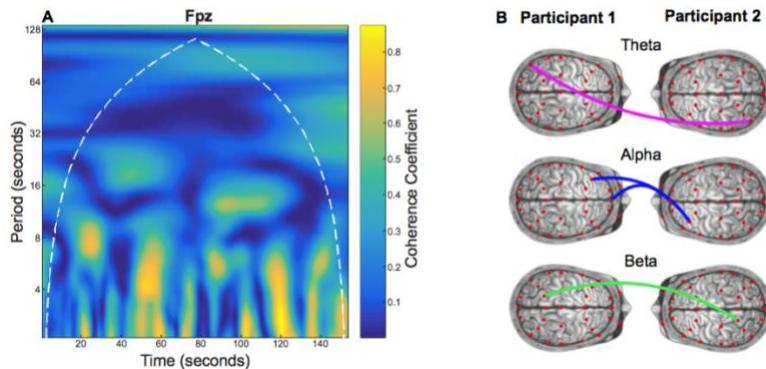


Figure 2. (A) Wavelet Transform Coherence in Fpz Between Two Subjects. The horizontal axis represents the time of the experimental task and the vertical axis represents the period (s) of wavelets. (B) Topographic Representation of Coherence Results. Connections represent significant level of coherence between the two participants ($p < 0.05$). Each color is associated with a frequency band: purple – theta, blue – alpha, green – beta.

The application of WTC as an additional analysis tool in this instance provided far deeper insight than single subject analysis alone, without WTC our interpretation of the results would not have allowed us to differentiate brain activity between competition and collaboration. While the single subject analysis provided essential information about the cortical areas involved in social interaction, WTC offered a unique snapshot of the interaction between subjects that proved fundamental to our understanding and interpretation of social interactions during task completion. Thus, without both types of

analysis, our interpretation of the results would have lacked depth and the extra dimensionality, that is the bedrock of neurophysiological inference.

Conclusion

As societies needs for the development of ever more complex information system accelerates so to must our understanding of how those systems interact with and affect users. We believe that hyperscanning and wavelet transform coherence analysis will prove to be valuable tools in the arsenal of NeuroIS research moving forward. Hyperscanning allows researchers to switch from single-brain to multi-brain experimental paradigms, without impeding single brain analysis. Hyperscanning data, in an information system context, contains both single and multiple concurrent user data and offers substantial information gain, in terms of usability and cooperative-competitive team-based activities during IS use and task completion. The addition of WTC analysis provides a versatile "tool" agnostic approach to data visualization and interpretation. The main advantage of WTC is the coherence coefficient heatmap, which gives a narrative form of analysis allowing for the easy identification of periods of synchronous or asynchronous behaviour and the intensity of brain activity during the completion of a task, this we believe makes WTC a strong tool for applied research. Hyperscanning and WTC are at the junction of information technologies, neuroscience, and human factor/management. They have many potential applications such as team efficiency [21,22], neuro-information systems [23], user experience [24] and management [25,26].

References

1. Babiloni, F., & Astolfi, L. (2014). Social neuroscience and hyperscanning techniques: Past, present and future. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 44, 76–93.
2. Lieberman, M. D. (2007). Social cognitive neuroscience: a review of core processes. *Annual Review in Psychology*, 58, 259–289.
3. Montague, P. R., Berns, G. S., Cohen, J. D., McClure, S. M., Pagnoni, G., Dhamala, M., ... Fisher, R. E. (2002). Hyperscanning: Simultaneous fMRI during linked social interactions. *NeuroImage*, 16(4), 1159–1164.
4. Cui, X., Bryant, D. M., & Reiss, A. L. (2012). NIRS-based hyperscanning reveals increased interpersonal coherence in superior frontal cortex during cooperation.

- NeuroImage*, 59(3), 2430–2437.
5. Dumas, G., Nadel, J., Soussignan, R., Martinerie, J., & Garnero, L. (2010). Inter-brain synchronization during social interaction. *PLOS One*, 5(8), e12166.
 6. Horat, S. K., Prévot, A., Richiardi, J., Herrmann, F. R., Favre, G., Merlo, M. C. G., & Missonnier, P. (2017). Differences in Social Decision-Making between Proposers and Responders during the Ultimatum Game: An EEG Study. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 11(July).
 7. Toppi, J., Borghini, G., Petti, M., He, E. J., De Giusti, V., He, B., ... Babiloni, F. (2016). Investigating cooperative behaviour in ecological settings: An EEG hyperscanning study. *PLOS One*, 11(4), 1–26.
 8. Loos, P., Riedl, R., Müller-Putz, G.R., Vom Brocke, J., Davis, F.D., Banker, R.D & Léger, P.-M. "NeuroIS: neuroscientific approaches in the investigation and development of information systems." *Business & Information Systems Engineering* 2, no. 6 (2010): 395-401.
 9. Riedl, R., & Léger, P.-M. (2016). Fundamentals of NeuroIS. *Studies in Neuroscience, Psychology and Behavioural Economics*. Springer, Berlin, Heidelberg.
 10. Bastarache-Roberge, M.-C., Léger, P.-M., Courtemanche, F., Sénécal, S., & Fredette, M. (2015). Measuring flow using psychophysiological data in a multiplayer gaming context. In *Information Systems and Neuroscience* (pp. 187–191). Springer.
 11. Dimoka, A., Benbasat, I., Davis, F. D., Dennis, A. R., Gefen, D., & Weber, B. (2012). On the use of neurophysical tools in IS research: Developing a research agenda for NeuroIS. *MIS Quarterly*, 36(3), 679–702.
 12. Labonté-LeMoine, É., Léger, P. M., Resseguier, B., Bastarache-Roberge, M. C., Fredette, M., Sénécal, S., & Courtemanche, F. (2016, May). Are We in Flow Neurophysiological Correlates of Flow States in a Collaborative Game. *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1980-1988). ACM.
 13. Léger, P.-M., Sénécal, S., Aubé, C., Cameron, A.-F., & others. (2013). The influence of group flow on group performance: a research program. *Proceedings of the Gmunden Retreat on NeuroIS*, 13.
 14. Mu, Y., Cerritos, C., & Khan, F. (2018). Neural mechanisms underlying interpersonal

- coordination: A review of hyperscanning research. *Social and Personality Psychology Compass*, 12(11).
15. Stam, C. J., Nolte, G., & Daffertshofer, A. (2007). Phase lag index: assessment of functional connectivity from multi channel EEG and MEG with diminished bias from common sources. *Human Brain Mapping*, 28(11), 1178–1193.
 16. Grinsted, A., Moore, J. C., & Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11(5/6), 561–566.
 17. Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1), 61–78.
 18. Chang, C., & Glover, G. H. (2010). Time--frequency dynamics of resting-state brain connectivity measured with fMRI. *Neuroimage*, 50(1), 81–98.
 19. Addison, P. S. (2017). *The illustrated wavelet transform handbook: introductory theory and applications in science, engineering, medicine and finance*. CRC press.
 20. Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Research Reviews*, 29(2–3), 169–195.
 21. Dodel, S., Cohn, J., Mersmann, J., Luu, P., Forsythe, C., & Jirsa, V. (2011). Brain Signatures of Team Performance. In D. D. Schmorow & C. M. Fidopiastis (Eds.), *Foundations of Augmented Cognition. Directing the Future of Adaptive Systems* (pp. 288–297). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
 22. Stevens, R., Galloway, T., Wang, P., Berka, C., Tan, V., Wohlgemuth, T., ... Buckles, R. (2013). Modeling the neurodynamic complexity of submarine navigation teams. *Computational and Mathematical Organization Theory*, 19(3), 346–369.
 23. Dimoka, A., Pavlou, P. A., & Davis, F. D. (2011). Research commentary—NeuroIS: the potential of cognitive neuroscience for information systems research. *Information Systems Research*, 22(4), 687–702.
 24. Pan, Y., Cheng, X., Zhang, Z., Li, X., & Hu, Y. (2017). Cooperation in lovers: An fNIRS-based hyperscanning study. *Human Brain Mapping*, 38(2), 831–841.
 25. Astolfi, L., Toppi, J., Borghini, G., Vecchiato, G., He, E. J., Roy, A., ... Babiloni, F. (2012). Cortical activity and functional hyperconnectivity by simultaneous EEG recordings from interacting couples of professional pilots. *Proceedings of the Annual*

- International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, 4752–4755.
26. Bezerianos, A., Sun, Y., Chen, Y., Woong, K. F., Taya, F., Arico, P., ... Thakor, N. (2015). Cooperation driven coherence: Brains working hard together. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, 2015–Novem, 4696–4699.

Conclusion

L'objectif de ce mémoire est d'explorer les bases neurophysiologiques de la collaboration ainsi que son impact sur la performance. Plus précisément, ce mémoire a permis d'obtenir une compréhension affinée des mécanismes impliqués dans différents contextes sociaux et le rôle de la synchronicité inter-cérébrale dans la médiation de ces-mêmes mécanismes.

Une expérience en laboratoire intra-sujet a été réalisée à l'hiver 2014 avec un total de 40 participants formant 20 équipes. Ceux-ci devaient accomplir une tâche informatique dans quatre conditions différentes : collaboration, compétition, participation autonome et observation passive. Chaque participant a été rémunéré à l'aide d'un coupon COOP HEC de 30\$. Pour chaque condition, la performance, les modulations des bandes de fréquences et la variation de la synchronicité inter-cérébral ont été collectées à l'aide d'outils neurophysiologiques (EEG) et de données comportementales (performance à la tâche). Les modulations des activations cérébrales ont ensuite été comparées entre chaque condition sur les plans individuel (bande de fréquence) et interindividuel (synchronicité inter-cérébrale). Des corrélations entre la performance dans chaque contexte et les activations ont également été calculées. Cette collecte de données a permis à l'étudiant de ce mémoire de rédiger deux articles rapportant dans le détail les résultats de recherche ainsi que les méthodes d'analyses innovantes employées.

Ce dernier chapitre rappelle les questions de recherche de ce mémoire et présente les principaux résultats. Les contributions théoriques et pratiques de ce mémoire, ainsi que les limites de cette étude et les futures recherches sont ensuite abordées.

Rappel des questions de recherche et principaux résultats

Les résultats de cette recherche ont permis de répondre aux deux questions de ce mémoire, soit :

Existe-t-il une activation neurophysiologique spécifique à la collaboration ?

Les modulations de l'activité cérébrale sont-elles corrélées avec la performance ?

Plus précisément, plusieurs hypothèses issues du premier article ont été formulées en se basant sur la littérature en hyperscanning et en neurosciences cognitives sociales : la collaboration est associée à des activations corticales spécifiques principalement localisées dans la région frontale (H1). Ces activations corticales relèvent de la bande de fréquence alpha (H2). La synchronicité inter-cérébrale des zones associées à la collaboration est corrélée à la performance (H3).

Les résultats de cette étude renforcent les hypothèses H1 et H2. En effet, les résultats démontrent une augmentation de la synchronicité inter-cérébrale en région frontale et préfrontale dans la bande de fréquence alpha, uniquement dans un contexte de collaboration. Les autres activités synchrones identifiées au travers des différents contextes sociaux et bandes de fréquences sont associées à la nature visuo-motrice de la tâche informatique à compléter. Le rôle des bandes de fréquences Thêta et Beta est toutefois intéressant, car ils furent observés à de multiples reprises sans devenir un sujet de recherche spécifique (Pérez et coll., 2017; Sciaraffa et coll., 2017; Szymanski et coll., 2017; Toppi et coll., 2016). Ainsi, il est possible de répondre à la première question de recherche par l'affirmative et d'affirmer que la collaboration semble être associée à des activations neurophysiologiques spécifiques. Il est toutefois impossible de statuer que le contexte social de la collaboration est la cause d'une telle activation. D'autres recherches sont nécessaires afin d'affiner les résultats obtenus dans cette étude et de tester les différentes causes potentielles (ex. inhibition d'un comportement par ajustement à autrui vs. augmentation de la concentration et de l'effort cognitif) de la synchronicité inter-cérébrale durant un épisode de collaboration.

En ce qui concerne la seconde question de recherche, les résultats sont nuancés. Aucune corrélation significative entre la performance et la synchronicité inter-cérébrale n'a été trouvée. Il est donc impossible de rejeter l'hypothèse nulle H3. Cependant, des corrélations significatives entre la performance et les activations individuelles ont été trouvées. Plus précisément, les bandes de fréquence alpha et beta sont corrélées

négativement avec la performance en région frontale et préfrontale, et ce dans chaque condition. Ce qui ouvre la voie à de nouvelles recherches afin d'éclaircir la possible présence d'un lien entre la performance et l'activité cérébrale d'un individu. La bande de fréquence thêta ne présente aucune corrélation significative avec la performance.

Contributions

Comme évoqué dans l'introduction, les neurosciences organisationnelles sont en plein essor et trouvent des applications dans tous les domaines d'une entreprise, des ressources humaines jusqu'à la finance (Becker et coll., 2011). Le présent mémoire s'inscrit dans cette croissance des neurosciences organisationnelles et contribue autant au développement des connaissances sur le plan théorique, qu'il ouvre la voie à des applications sur le plan pratique.

Du point de vue théorique, les travaux de recherche réalisés dans le cadre de ce mémoire démontrent dans un premier temps l'applicabilité des méthodes d'hyperscanning au sein des neurosciences organisationnelles. La barrière méthodologique que constituait l'enregistrement simultané de plusieurs individus est désormais franchie. L'hyperscanning est susceptible de devenir un outil de prédilection pour les chercheurs et les organisations dans l'étude et l'optimisation des interactions (Babiloni et Astolfi, 2014; Mu et coll., 2018). De plus, l'utilisation de l'hyperscanning, au-delà de l'effort méthodologique, permet d'intégrer de façon dynamique et contextuelle les résultats de cette recherche. Cette contribution est d'autant plus importante que les interactions sociales, en particulier dans un cadre de travail, reposent sur le principe fondamental de la gestalt : "Le tout est plus grand que la somme de ses parties" (Koffka, 2013). Or, le seul paradigme en neurosciences permettant de mesurer les équipes en tant qu'entité, en plus des individus qui la composent est l'hyperscanning.

La seconde contribution théorique de ce mémoire se retrouve dans les résultats. Plus précisément, ces travaux sont précurseurs au sein des neurosciences organisationnelles et les résultats obtenus permettent d'affiner les connaissances sur le fonctionnement neurophysiologique des interactions sociales et de la collaboration tout particulièrement. Plus précisément, ils confortent les résultats des recherches précédentes en neurosciences sociales et neurosciences cognitives sur l'existence d'activations spécifiques à la

collaboration tout en apportant plusieurs nuances telles que sur les corrélations avec la performance ou la mise en perspective des activités cérébrales individuelles.

Du point de vue pratique, la nature exploratoire et fondamentale de la recherche réalisée dans le cadre de ce mémoire empêche toutes applications directes et concrètes des résultats. Toutefois, le franchissement de la barrière méthodologique que constituait l'hyper-scanning pour les neurosciences organisationnelles ouvre la voie à de nombreuses opportunités pour les domaines du management et des technologies de l'information. Il est envisageable de développer des outils de gestion intégrant – entre autres – la synchronicité inter-cérébrale des utilisateurs afin, par exemple, d'optimiser les interfaces ou bien la quantité d'informations transmises à un individu dans le but de s'assurer de ne pas le surcharger. Cette application et les étapes à franchir pour son développement seront abordées plus amplement dans la section “recherches futures”.

La seconde application émanant de cette recherche est les liens qu'il est possible de tisser entre les résultats et les pratiques de gestion. D'une part, les résultats démontrent sous un nouvel angle l'importance d'une relation de collaboration de qualité, comme suggérée par la corrélation entre l'activité cérébrale et la performance. D'autre part, les résultats démontrent la nature hautement gestaltique des interactions sociales, tel que constaté par la complémentarité des activations individuelles et de la synchronicité inter-cérébrale.

Enfin, les travaux réalisés dans le cadre du présent mémoire mettent en lumière le potentiel des neurosciences organisationnelles et l'enjeu entourant leur désenca斯特rement. En effet, comme évoqué dans l'introduction le plein potentiel des neurosciences organisationnelles ne pourra être exploité qu'une fois intégrer horizontalement au sein des différents domaines de compétence d'une entreprise. Le présent mémoire s'inscrit dans cette volonté d'offrir les outils et méthodes nécessaires à l'implantation des neurosciences au cœur des organisations.

Limits

Les recherches réalisées dans le cadre de ce mémoire présentent plusieurs limites qui seront traitées les unes après les autres. Dans un premier temps, les limites inhérentes aux

neurosciences organisationnelles seront abordées, dans un second temps, les limites propres à la méthodologie et aux interprétations des résultats seront énoncées.

Premièrement, les neurosciences organisationnelles se confrontent à une limite majeure : l'extrapolation des résultats. En effet, si les recherches sont menées avec rigueur et transparence, et leurs résultats interprétés avec scepticisme et esprit critique par la communauté scientifique. L'enthousiasme du monde professionnel pour les neurosciences en fait un terrain propice aux effets de modes et aux mauvaises interprétations des résultats. À ce jour, les découvertes en neurosciences sont encore très limitées dans leur transférabilité et leur applicabilité en milieu de travail. À titre d'exemple, la découverte des neurones miroirs et de leur rôle dans l'interprétation des émotions a provoqué un véritable emballement. Pour rappel, les neurones miroirs sont une catégorie de neurones découverte dans les années 1990 (Rizzolatti et Craighero, 2004). Ils présentent une activité aussi bien lorsqu'un individu exécute une action que lorsqu'il observe un autre individu exécuter la même action, ou même lorsqu'il imagine une telle action (Rizzolatti et Craighero, 2004). Cette découverte a révolutionné la compréhension des humains en tant qu'êtres sociaux et les connaissances sur l'expérience partagée (Goleman, 2006). Cependant, ils furent rapidement considérés – à tort – comme la base de tous nos comportements sociaux, notre capacité d'apprentissage, notre altruisme, nos orientations politiques ou encore notre empathie (Rizzolatti et Sinigaglia, 2015). En d'autres mots, les neurones miroirs furent considérés comme le vecteur fondamental de nos comportements sociaux. La phrase précédente est totalement fausse. Les neurones miroirs font partie d'un ensemble de structure et de circuits complexes permettant les interactions sociales (Rizzolatti et Craighero, 2004; Rizzolatti, Fogassi et Gallese, 2001; Rizzolatti et Sinigaglia, 2015). Ils constituent un maillon de cette chaîne, certes indispensable, mais n'étant pas suffisant pour permettre le fonctionnement social à eux seul. Le monde de l'entreprise a probablement été le plus prolifique concernant les exagérations du rôle des neurones miroirs. Cependant, des recherches ont démontré leur rôle dans le leadership charismatique ou le harcèlement au travail (anglais : *bullying*) ou encore les pseudo-consensus (Becker et coll., 2011; Jack et coll., 2019; Rizzolatti et Fabbri-Destro, 2008).

La critique précédente envers la transférabilité et l'extrapolation est également valable pour les résultats de recherche de ce mémoire. Sur le plan pratique, si les résultats obtenus démontrent une activité corticale spécifique à la collaboration, il serait erroné de faire un raccourci et d'affirmer qu'une équipe performante est une équipe “sur la même longueur d'onde”. Tout d'abord, les résultats démontrent des corrélations entre les activations individuelles et non pas la synchronicité inter-cérébrale. Ensuite, de multiples recherches sont encore nécessaires afin de déterminer si la variation des activations individuelles est associée – voire même induite – par le contexte de collaboration et comment la synchronisation inter-cérébrale modère cette relation. En d'autres mots, la chronologie de l'émergence de la synchronicité inter-cérébrale est à éclaircir. Enfin, la présence d'une activation dans un contexte donné et pour une tâche donnée ne signifie aucunement que cela en est la cause (corrération vs. causalité). Pour être précis, les activations observées en région frontale et préfrontale dans la bande de fréquence alpha peuvent être issues d'une inhibition d'un comportement ou bien d'une augmentation de la charge cognitive. Ces deux hypothèses sont à vérifier et d'autres recherches sont, là encore, nécessaires afin de pouvoir statuer sur ce point.

Sur le plan méthodologique, l'expérience a été réalisée en laboratoire et constituait en une tâche informatique simplifiée. Ainsi, cette recherche fondamentale est en réalité très éloignée d'un contexte organisationnel avec un niveau élevé d'interactions et de réflexions. De plus, la méthode *Wavelet Transform Coherence* présente plusieurs limites, notamment le fait de ne pas avoir été conçue dans le but de réaliser des analyses statistiques, mais seulement de générer des cartes de cohérence (carte de chaleur). Ainsi, les chercheurs en neurosciences doivent développer des protocoles d'analyses adapter à cette méthode et s'assurer que l'analyse ne soit pas biaisée par les caractéristiques de leurs protocoles. De plus, sur le plan pratique, la méthode WTC ne permet la comparaison que de deux signaux uniquement, ce qui là encore affecte son applicabilité en contexte organisationnel et impose de la recherche et du développement afin de permettre l'analyse d'équipes au complet.

En somme, les résultats de cette recherche doivent être interprétés avec scepticisme et retenue. Ils sont certes valides et les articles rédigés dans le cadre de ce mémoire sont sur le point d'être publiés dans des revues scientifiques révisées par les

pairs. Cependant, la nature exploratoire de cette recherche et la quantité importante de travaux encore nécessaire à la bonne compréhension des mécanismes sous-jacents à la collaboration de façon générale, mais également de façon plus appliquée impose une grande prudence.

Application en management

En s'affranchissant des contraintes techniques associées aux neurosciences et en s'accordant une certaine liberté de réflexion, il est possible d'ouvrir des axes de réflexions sur les applications en management de la synchronicité inter-cérébrale. Tel que mentionné en introduction, plusieurs travaux en neurosciences sociales ont démontré le potentiel de cette discipline pour améliorer l'efficacité des équipes (Schmorow & Fidopiastis, 2011 ; Stevens et al., 2013).

Une première application en management est en lien avec la sécurité psychologique des membres d'une équipe. La sécurité psychologique est définie comme la croyance partagée – la plupart du temps tacite – par les membres d'une équipe selon laquelle l'équipe constitue un espace sécuritaire pour la prise de risque interpersonnel (Edmondson, 1999). La sécurité psychologique est distincte de la cohésion d'équipe dans la mesure où, la cohésion est associée à une réduction de la volonté à être en désaccord et à donner la contradiction aux membres de son équipe, ce qui peut entraîner un effet de pensée de groupe et donc un manque de prise de risque interpersonnel (Janis, 1982). La sécurité psychologique est reliée à la capacité d'apprentissage des équipes, de sorte que plus une équipe présente une sécurité psychologique importante, plus sa capacité d'apprentissage sera élevée. *A fortiori*, la sécurité psychologique influence la performance d'équipe, dans la mesure où la performance d'équipe est reliée à la capacité d'apprentissage et que leur relation est modérée par la sécurité psychologique (Edmondson, 1999). Aucune recherche n'a encore relié la sécurité psychologique avec l'activités neurophysiologique des individus composant une équipe, toutefois, la synchronisation inter-cérébrale offre un angle d'application particulièrement intéressant. En effet, une sécurité psychologique plus élevée entraîne une collaboration au sein de l'équipe accrue. Il est donc pertinent de questionner le rôle que la synchronisation inter-cérébrale joue sur l'intégration des comportements, des pensées et des dynamiques

interindividuelles au sein d'une équipe. En supposant que la synchronicité inter-cérébrale ait un effet sur ces comportements, il serait alors possible d'identifier les points de frictions d'une équipe qui nuisent à la sécurité psychologique et à l'inverse de déterminer les leviers contribuant au développement de la sécurité psychologique. Il serait également possible d'identifier quels membres ont le plus d'influences les uns sur les autres et seraient ainsi capable de générer une forme d'inertie au sein de l'équipe afin de catalyser son fonctionnement. Sur un plus long terme, il serait même possible de réaliser un suivi de l'évolution de la sécurité psychologique d'une équipe en se basant sur l'activité neurophysiologique de ses membres et d'adopter les pratiques nécessaires à la développer, maintenir ou rétablir.

Une seconde application en management est associée à la contagion émotionnelle. La contagion émotionnelle est définie comme la transmission des émotions, des expressions, des postures et des mouvements d'un individu à un autre (ou plusieurs) conduisant à une convergence émotionnelle (Hatfield, Cacioppo & Rapson, 1993). Plusieurs travaux en neurosciences sociales ont déjà mis en lumière des mécanismes cérébraux responsables de cette contagion émotionnelle (Rizzolatti & Sinigaglia, 2015), cependant leurs résultats ne reflétaient le fonctionnement cérébral que d'un individu spécifiquement. La synchronicité inter-cérébrale offre un angle d'interprétation de ce phénomène intégrant la dimension interpersonnelle qui est essentielle à la compréhension des dynamiques interpersonnelles à l'origine de la contagion émotionnelle et menant à une forme de convergence émotionnelle. Plus précisément, dans un cadre de management la synchronicité inter-cérébrale offre un nouvel angle d'interprétation à certains phénomènes de contagion tels que le stress ou bien le flow, autant de facteurs aussi bien positifs que négatifs étant reliés à la performance et à la créativité d'une équipe (Van Hoorebeke, 2015; Barsade 2002). La compréhension approfondie du phénomène de contagion émotionnelle que permet d'entrevoir la synchronicité inter-cérébrale constitue donc un sujet d'intérêt permettant d'adapter et développer des pratiques en management afin d'influencer la synchronicité inter-cérébrale à l'avantage des équipes et des individus qui les composent.

En somme, la synchronicité inter-cérébrale dispose d'un potentiel d'application très élevé en management. Toutefois, il est nécessaire d'être extrêmement précautionneux

dans l'utilisation des résultats de ce mémoire et surtout d'être conscient que plusieurs étapes en recherche doivent être franchies afin de développer de telles applications. Les futures recherches seront abordées dans la section suivante de ce chapitre.

Recherches futures

La nature fondamentale des travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire ouvre la voie à un grand nombre de recherches subséquentes autant fondamentales qu'appliquées. Comme évoqué dans les parties précédentes, il est nécessaire dans un premier temps de consolider les résultats de ces travaux sur les fondements neurophysiologiques de la collaboration. Pour ce faire, la reproduction de cette recherche auprès de certaines populations telles que les personnes atteintes du syndrome autistique (TSA). Comparer leur activité cérébrale à celle de participants neurotypiques pourrait être une recherche intéressante, étant donné que les TSA sont associés à des déficits de la théorie de l'esprit (Baron-Cohen, 2006). D'autres recherches devraient également porter sur la dynamique de la synchronicité inter-cérébrale en ce qui concerne la familiarité des interlocuteurs ainsi que la nature de leur relation (ex. professionnel vs. proche). Il serait intéressant d'investiguer si une plus grande familiarité est associée à une synchronicité inter-cérébrale accrue lors d'une tâche. Enfin, sur le plan fondamental, des recherches plus poussées pourraient également examiner la variation de la synchronicité inter-cérébrale en lien avec la performance, lorsque la difficulté d'une tâche est modulée et/ou la rétroaction est mensongère (ex. indiquer une réussite alors que l'essai est échoué). Les recherches proposées ci-dessus relèvent des neurosciences fondamentales et visent à confirmer ou infirmer les postulats de notre recherche. Elles peuvent être réalisées en conservant le même paradigme expérimental, cela est même nécessaire afin de garantir la comparabilité des résultats entre les différentes études.

Des recherches plus appliquées sont également envisageables notamment en ce qui a trait aux applications en hyperscanning. Par exemple, le développement d'un indice de collaboration est un sujet à très fort potentiel. Cela consisterait à créer une échelle de mesure basée sur la synchronicité inter-cérébrale des participants qui permettrait en temps réel d'évaluer le niveau de collaboration d'une équipe sur le plan cérébrale. Une telle

mesure permettrait ainsi d'attribuer des tâches aux membres d'une équipe en fonction de leurs dispositions cognitives ou bien d'adapter leur interface de travail afin de faciliter la collaboration. Les déclinaisons de cette technologie sont nombreuses et leurs plus-values autant pour la recherche académique que les applications concrètes en organisation encore inexploitées.

Bien sûr, une telle technologie nécessite encore énormément de recherche et de développement. Pour parvenir à développer un outil viable, il faut dans un premier temps répondre à trois enjeux méthodologiques. Premièrement, il est nécessaire de confirmer la présence d'activation cérébrale spécifique à la collaboration – d'où l'importance des recherches fondamentales suggérées dans le paragraphe précédent. Deuxièmement, il faut adapter les méthodes en hyperscanning actuelles afin de permettre l'analyse simultanée des membres d'une équipe et non plus seulement d'une dyade. Troisièmement, le développement de méthodes de traitement en temps réel d'un signal en neuroimagerie s'impose. Plusieurs recherches ont déjà démontré la faisabilité de cette démarche, cependant, des progrès sont encore à réaliser afin de satisfaire aux standards de l'hyperscanning (Demazure, 2018). En parallèle des enjeux méthodologiques, les contextes d'implantation de cette technologie posent une autre difficulté. En effet, les outils de neuroimagerie – même les plus petits – sont encore aujourd'hui imposants et inconfortables. Or, il faut tenir compte de la réalité de travail des individus et s'assurer de ne pas entraver ni leur capacité de mouvements ni leur confort. Ainsi, le développement d'instruments de mesure à la fois précis et adaptés à la réalité du terrain constitue en soi un autre défi auquel il faut répondre (ex. casque de chantier avec électrodes intégrées). Il est important de souligner que les avantages des outils de mesures neurophysiologiques ne se limitent pas à évaluer le niveau de collaboration d'une équipe. Ils permettraient également de réaliser un ensemble de mesure individuelle permettant moduler son environnement de travail en fonction de ses ressources cognitives ou bien de son niveau d'éveil (Morris, 2018). Autant de fonctionnalité faisant écho à la place croissante des technologies et du numérique dans les organisations.

Conclusion générale

Les neurosciences constituent un domaine d'intérêt croissant pour les organisations dont l'émergence des neurosciences organisationnelles en est le reflet. La recherche réalisée dans le cadre de ce mémoire s'inscrit dans ce courant à la fois conscient du potentiel des neurosciences pour les organisations, mais également soucieux de la transférabilité de ses résultats à la réalité du terrain. C'est pourquoi les résultats de cette recherche doivent être interprétés avec scepticisme et retenue, notamment compte tenu de sa nature exploratoire. De nombreux travaux sont encore nécessaires à la bonne compréhension des mécanismes sous-jacents à la collaboration. Toutefois, l'intérêt du milieu académique et l'enthousiasme des organisations pour les interactions sociales confortent l'idée qu'une compréhension profonde des systèmes cérébraux impliqués dans la collaboration sera achevée dans les années à venir. Plus largement, les neurosciences incarnent aujourd'hui un des axes de recherches parmi les plus complexes, mais également les plus prometteurs pour permettre aux organisations de se développer, d'innover et de continuer à s'améliorer autant au niveau technologique que sur le plan humain.

Bibliographie

- Addison, Paul S (2017). *The illustrated wavelet transform handbook: introductory theory and applications in science, engineering, medicine and finance*, (2^e éd.). Boca Raton, CRC press, 446 p.
- Ahn, Sangtae, Hohyun Cho, Moonyoung Kwon, Kiwoong Kim, Hyukchan Kwon, Bong Soo Kim, *et al.* (2018). « Interbrain phase synchronization during turn-taking verbal interaction—a hyperscanning study using simultaneous EEG/MEG », *Human Brain Mapping*, vol. 39, no 1, p. 171–188.
- Ashkanasy, Neal M (2003). « Emotions and Emotional Regulation in HRM: A Multi-Level Perspective », *Research in Personnel and Human Resources Management*, vol. 35, no 1, p. 9–54.
- Astolfi, Laura, Febo Cincotti, Donatella Mattia, Fabrizio De Vico Fallani, Serenella Salinari, Giovanni Vecchiato, *et al.* (2010). « Imaging the social brain: Multi-subjects EEG recordings during the “Chicken’s game” », *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 32, no 1, p. 1734–1737.
- Astolfi, Laura, Jlenia Toppi, Gianluca Borghini, Giovanni Vecchiato, J-E He, Abhrajeet Roy, *et al.* (2012). « Cortical activity and functional hyperconnectivity by simultaneous EEG recordings from interacting couples of professional pilots. », *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 34, no 1, p. 4752–4755.
- Astolfi, Laura, Jlenia Toppi, Fabrizio De Vico Fallani, Giovanni Vecchiato, Serenella Salinari, Donatella Mattia, *et al.* (2010). « Neuroelectrical hyperscanning measures simultaneous brain activity in humans. », *Brain Topography*, vol. 23, no 3, p. 243–256.
- Babiloni, Claudia, Paola Buffo, Fabrizio Vecchio, Nicola Marzano, Claudio Del Percio, Danilo Spada, *et al.* (2012). « Brains “in concert”: Frontal oscillatory alpha rhythms and empathy in professional musicians. », *NeuroImage*, vol. 60, no 1, 105–116.
- Babiloni, Fabio et Laura Astolfi (2014). « Social neuroscience and hyperscanning techniques: Past, present and future. », *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, vol. 44, no 1, p. 76–93.

- Babiloni, Fabio, Febo Cincotti, Donatella Mattia, Fabrizio De Vico Fallani, Andrea Tocci, Luigi Bianchi, et al. (2007). « High resolution EEG hyperscanning during a card game. », *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, vol. 29, no 1, p. 4957–4960.
- Babiloni, Fabio, Febo Cincotti, Donatella Mattia, Marco Mattiocco, Fabrizio De Vico Fallani, Andrea Tocci, et al. (2006). « HypermETHODS for EEG hyperscanning. », *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, vol. 28, no 1, p. 3666–3669.
- Balconi, Michela et Maria E. Vanutelli (2017). « Cooperation and Competition with Hyperscanning Methods: Review and Future Application to Emotion Domain. », *Frontiers in Computational Neuroscience*, vol. 11, no 9, p. 1–6.
- Baron-Cohen, Simon (2006). « The hyper-systemizing, assortative mating theory of autism. », *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, vol. 30, no 5, p. 865–872.
- Barr, Pamela S., J. L. Stimpert, et Anne S. Huff (1992). « Cognitive change, strategic action, and organizational renewal. », *Strategic Management Journal*, vol. 13, no 1, p. 15–36.
- Barsade, Sigal G., Lakshmi Ramarajan et Drew Westen (2009). « Implicit affect in organizations. » *Research in Organizational Behavior*, vol. 29, no 1, p. 135–162.
- Barsade, Sigal G. (2002). « The ripple effect: Emotional contagion and its influence on group behavior. », *Administrative science quarterly*, vol. 47, no 4, p. 644-675.
- Bastarache-Roberge, Marie-Christine, Pierre-Majorique Léger, François Courtemanche, Sylvain Sénécal et Marc Fredette (2015). « Measuring flow using psychophysiological data in a multiplayer gaming context », dans Fred D. Davis (dir.), *Information Systems and Neuroscience : Gmunden Retreat on NeuroIS 2015*, (1^e éd.). Gmunden, Springer, p. 187–191.
- Bear, Mark F., Barry W. Connors et Michael A. Paradiso (2016). *Neurosciences : À la découverte du cerveau*, (4^e éd.). Ballan Miré, PRADEL, 1016 p.
- Beard, Keith W. et Eve M. Wolf (2001). « Modification in the proposed diagnostic criteria for Internet addiction. », *Cyberpsychology & Behavior*, vol. 4, no 3, p. 377–383.
- Becker, William J., Russell Cropanzano, Alan G. Sanfey (2011). « Organizational neuroscience: Taking organizational theory inside the neural black box. », *Journal of Management*, vol. 37, no 4, p. 933–961.

- Bezerianos, Anastasios, Yu Sun, Yu Chen, Kian-Fong Woong, Fumihiko Taya Pietro Arico (2015). « Cooperation driven coherence: Brains working hard together. », *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 37, no 1, p. 4696–4699.
- Blakemore, Sarah-Jayne, Joel Winston et Uta Frith (2004). « Social cognitive neuroscience: where are we heading? », *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 8, no 5, p. 216–222.
- Burgess, Adrian P. (2013). On the interpretation of synchronization in EEG hyperscanning studies: a cautionary note. *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 7, no 12, p. 1–17.
- Burnes, Bernard et David Bargal (2017). « Kurt Lewin: 70 years on. », *Journal of Change Management*, vol. 17, no 2, p. 91–100.
- Butler, Michael J. R. et Carl Senior (2007). « Toward an organizational cognitive neuroscience. », *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1118, no 1, p. 1–17.
- Cacioppo, John T. et Gary G. Berntson (1992). « Social Psychological Contributions To the Decade of the Brain », *American Psychologist*, vol. 47, no 8, p. 1019–1028.
- Camerer, Collin F. (2008). « Neuroeconomics: opening the gray box. », *Neuron*, vol. 60, no 3, p. 416–419.
- Chang, Catie et Gary H. Glover (2010). « Time--frequency dynamics of resting-state brain connectivity measured with fMRI », *Neuroimage*, vol. 50, no 1, p. 81–98.
- Chiu, Pearl H., M. Amin Kayali, Kenneth T. Kishida, Damon Tomlin, Laura G. Klinger, Mark R. Klinger, *et al.* (2008). « Self Responses along Cingulate Cortex Reveal Quantitative Neural Phenotype for High-Functioning Autism », *Neuron*, vol. 57, no 3, p. 463–473.
- Clithero, John A., Dharol Tankersley et Scott A. Huettel (2008). « Foundations of neuroeconomics: from philosophy to practice. », *PLoS Biology*, vol. 6, no 11, p. 298.
- Craver, Carl F. (2002). « Interlevel experiments and multilevel mechanisms in the neuroscience of memory. », *Philosophy of Science*, vol. 69, no 3, p. 83–97.
- Cui, Xu, Daniel M. Bryant et Allan L. Reiss (2012). « NIRS-based hyperscanning reveals increased interpersonal coherence in superior frontal cortex during cooperation. », *NeuroImage*, vol. 59, no 3, p. 2430–2437.

- Dane, Erik et Michael G. Pratt (2007). « Exploring intuition and its role in managerial decision making. », *Academy of Management Review*, vol. 32, no 1, p. 33–54.
- Delaherche, Emilie, Guillaume Dumas, Jacqueline Nadel et Mohamed Chetouani (2015). « Automatic measure of imitation during social interaction: A behavioural and hyperscanning-EEG benchmark. », *Pattern Recognition Letters*, vol. 66, no 1, p. 118–126.
- Delorme, Arnaud et Scott Makeig (2004). « EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. », *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 134, no 1, p. 9–21.
- Dikker, Suzanne, Lu Wan, Ido Davidso, Lisa Kaggen, Matthias Oostrik, James McClintonck, *et al.* (2017). « Brain-to-Brain Synchrony Tracks Real-World Dynamic Group Interactions in the Classroom. », *Current Biology*, vol. 27, no 9, p. 1375–1380.
- Dimoka, Angelika, Fred D. Davis, Alok Gupta, Paul A. Pavlou, Rajiv D. Banker, Alan R. Dennis, *et al.* (2012). « On the use of neurophysical tools in IS research: Developing a research agenda for NeuroIS. », *MIS Quarterly*, vol. 36, no 3, p. 679–702.
- Dimoka, Angelika, Paul A. Pavlou et Fred D. Davis (2011). « Research commentary—NeuroIS: the potential of cognitive neuroscience for information systems research. », *Information Systems Research*, vol. 22, no 4, p. 687–702.
- Dodel, Silke, Joseph Cohn, Jochen Mersmann, Phan Luu, Chris Forsythe, Viktor Jirsa, *et al.* (2011). « Brain Signatures of Team Performance. », *Foundations of Augmented Cognition. Directing the Future of Adaptive Systems*, p. 288–297
- Dommer, Lukas., Natalie Jäger, Felix Scholkmann, Martin Wolf, et Lisa Holper (2012). « Between-brain coherence during joint n-back task performance: A two-person functional near-infrared spectroscopy study. », *Behavioural Brain Research*, vol. 234, no 2, p. 212–222.
- Dulebohn, James H., Daonald E. Conlon, Issidoros Sarinopoulos, Robert B. Davison et Gerry McNamara (2009). « The biological bases of unfairness: Neuroimaging evidence for the distinctiveness of procedural and distributive justice. » *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, vol. 110, no 2, p. 140–151.

- Dumas, Guillaume, Fanny Lachat, Jacques Martinerie, Jacqueline Nadel, et Nathalie George (2011). « From social behaviour to brain synchronization: Review and perspectives in hyperscanning. » *IRBM*, vol. 32, no 1, p. 48–53.
- Dumas, Guillaume, Jacqueline Nadel, Robert Soussignan, Jacques Martinerie et Line Garnero (2010). « Inter-brain synchronization during social interaction. », *PloS One*, vol. 5, no 8, p. 12166.
- Edmondson, Amy (1999). « Psychological safety and learning behavior in work teams. », *Administrative science quarterly*, vol. 44, no 2, p. 350-383.
- Fugate, Douglas. L. (2007). « Neuromarketing: a layman's look at neuroscience and its potential application to marketing practice. », *Journal of Consumer Marketing*, vol. 24, no 7, p. 385–394.
- Funane, Tsukasa, Masashi Kiguchi, Hirokazu Atsumori, Hiroki Sato, Kisou Kubota, Hideaki Koizumi (2011). « Synchronous activity of two people's prefrontal cortices during a cooperative task measured by simultaneous near-infrared spectroscopy. », *Journal of Biomedical Optics*, vol. 16, no 7, doi:10.1117/1.3602853
- Gioia, Dennis A. et Kumar Chittipeddi (1991). « Sensemaking and sensegiving in strategic change initiation. », *Strategic Management Journal*, vol. 12, no 6, p. 433–448.
- Goleman, Daniel (2006). *Emotional intelligence*, (10^e éd.). New York, Bantam, 360 p.
- Grinsted, Aslak, John C. Moore, et Svetlana Jevrejeva (2004). « Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. », *Nonlinear Processes in Geophysics*, vol. 11, no 5, p. 561–566.
- Prasad, Lallan (2014). *Management Principles and Practices by Lallan Prasad and SS Gulshan*, (1^e éd.). New Delhi, Excel Books, p. 461.
- Harrison, Glenn W. (2008). « Neuroeconomics: A critical reconsideration. », *Economics & Philosophy*, vol. 24, no 3, p. 303–344.
- Hatfield, Elaine, Cacioppo, John T., Rapson, Richard L. (1993). « Emotional contagion. », *Current directions in psychological science*, vol. 2, no 3, p. 96-100.
- Horat, Sibylle K., Anne Prévote, Jonas Richiardi, François R. Herrmann, Grégoire Favre, Marco C. G. Merlo *et al.* (2017). « Differences in Social Decision-Making between Proposers and Responders during the Ultimatum Game: An EEG Study. », *Frontiers*

- in Integrative Neuroscience*, vol. 11, no 1, p. 7-13.
- Jack, Anthony I., Kylie C. Rochford, Jared P. Friedman, Angella M. Passarelli et Richard E. Boyatzis (2019). « Pitfalls in Organizational Neuroscience: A Critical Review and Suggestions for Future Research. », *Organizational Research Methods*, vol. 22, no 1, p. 421-458
- Janis, Irving L. (1982). *Groupthink: Psychological studies of policy decisions and fiascoes*, (1^{ère} éd.). Boston, Boston: Houghton Mifflin, 35 p.
- Jung, Tzzy-Ping, Scott Makeig, Colin Humphries, Te-Won Lee, Martin J. McKeown, Vicente Iragui *et al.* (2000). « Removing electroencephalographic artifacts by blind source separation. », *Psychophysiology*, vol. 37, no 2, p. 163–178.
- Kauppi, Jukka-Pekka (2010). « Inter-subject correlation of brain hemodynamic responses during watching a movie: localization in space and frequency. », *Frontiers in Neuroinformatics*, vol. 4, no 3, p. 1–10.
- King-Casas, Brooks, Damon Tomlin, Cedric Anen, Colin F. Camerer, Steven R. Quartz et P. Read Montague (2005). « Getting to Know You: Reputations and Trust in a Two-Person Economic Exchange. », *Science*, vol. 308, no 5718, p. 78–83.
- Kinreich, Sivan, Amir Djalovski, Lior Kraus, Yoram Louzoun et Ruth Feldman (2017). « Brain-to-Brain Synchrony during Naturalistic Social Interactions. », *Scientific Reports*, vol. 7, no 1, p. 1–12.
- Klimesch, Wolfgang (1999). « EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. », *Brain Research Reviews*, vol. 29, no 3, p. 169–195.
- Koffka, Kurt (2013). *Principles of Gestalt psychology*, (1^e éd.). London, Routledge, 732 p.
- Konovalov, Arkady et Ian Krajbich (2016). « Gaze data reveal distinct choice processes underlying model-based and model-free reinforcement learning. », *Nature Communications*, vol. 7, no 8.
- Konvalinka, Ivana, Markus Bauer, Carsten Stahlhut, Lars-Kai Hansen, Andreas Roepstorff et Crhis D. Frith (2014). « Frontal alpha oscillations distinguish leaders from followers: Multivariate decoding of mutually interacting brains. », *NeuroImage*, vol. 94, no 7, p. 79–88.

- Labonte-Lemoyne, Élise, Pierre-Majorique Léger, Beverly Resseguier, Marie-Christine Bastarache-Roberge, Marc Frédette, Sylvain sénécal *et al.* (2016). « Are We in Flow ? Neurophysiological Correlates of Flow States in a Collaborative Game. », *CHI Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, vol. 34, no 1, p. 1980–1988.
- Lee, Nick, Amanda J. Broderick et Laura Chamberlain (2007). « What is ‘neuromarketing’? A discussion and agenda for future research. », *International Journal of Psychophysiology*, vol. 63, no 2, p. 199–204.
- Lee, Nick, Carl Senior et Michael J. R. Butler (2012). « The Domain of Organizational Cognitive Neuroscience: Theoretical and Empirical Challenges. », *Journal of Management*, vol. 38, no 4, p. 921–931.
- Léger, Pierre-Majorique, Sylvain Sénécal, Caroline Aubé, Ann-Frances Cameron, Ana Ortiz de Guinez, Eric Brunelle *et al.* (2013). « The influence of group flow on group performance: a research program. », *Proceedings of the Gmunden Retreat on NeuroIS 2013*
- Lewis, Davis et Darren Bridger (2004). « Market researchers make increasing use of brain imaging. », *Nature Neuroscience*, vol. 7, no 7, p. 683.
- Li, Jian, Erte Xiao, Daniel Houser et P. Read Morgan (2009). « Neural responses to sanction threats in two-party economic exchange. », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106, no 39, p. 16835–16840.
- Lieberman, Matthew D. (2007). « Social cognitive neuroscience: a review of core processes. », *Annual Reviews in Psychology*, vol. 58, no 1, p. 259–289.
- Lindenberger, Ulman, Shu-Chen Li, Walter Gruber et Müller Viktor (2009). « Brains swinging in concert: Cortical phase synchronization while playing guitar. », *BMC Neuroscience*, vol. 10, no 1, p. 1–12.
- Liu, Ning, Charis Mok, Emily E. Witt, Anjali H. Pradhan, Jingyuan E. Chen et Allan L. Reiss (2016). « NIRS-Based Hyperscanning Reveals Inter-brain Neural Synchronization during Cooperative Jenga Game with Face-to-Face Communication. », *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 10, no 3, p. 1–11.
- Livingston, Robert B. (1966). « Brain mechanisms in conditioning and learning. », *Neurosciences Research Program*, vol. 4, no 3, p. 349-354.

- Loos, Peter, René Riedl, Gernot R. Müller-Putz, Jan Vom Brocke, Fred D. Davis, Rajiv D. Banker et Pierre-Majorique Léger (2010). « NeuroIS: neuroscientific approaches in the investigation and development of information systems. » *Business & Information Systems Engineering*, vol. 2, no 6, p. 395-401.
- Mahjoory, Keyvan, Vadim Nikulin, Loïc Botrel, Klaus Linkenkaer-Hansen, Marco M. Fato et Stefan Haufe (2017). « Consistency of EEG source localization and connectivity estimates. », *NeuroImage*, vol. 152, no 1, p. 590–601.
- Marrow, Alfred J. (1977). *The practical theorist: The life and work of Kurt Lewin*, (2^e éd.). New York, Teachers College Press, 290 p.
- McCabe, Kevin A. (2008). « Neuroeconomics and the economic sciences. », *Economics & Philosophy*, vol. 24, no 3, p. 345–368.
- Mead, Margaret (2018). *Cooperation and competition among primitive peoples*, (2^e éd.). London, Routledge, 545 p.
- Michel, Christoph M., Micah M. Murray, Göran Lantz, Sara Gonzalez, Laurent Spinelli et Rolando G. de Peralta (2004). « EEG source imaging. », *Clinical Neurophysiology*, vol. 115, no 10, p. 2195–2222.
- Montague, P. Read, Gregory S. Berns, Jonathan D. Cohen, Samuel M. McClure, Giuseppe Pagnoni, Mukesh Dhamala *et al.* (2002). « Hyperscanning: Simultaneous fMRI during linked social interactions. », *NeuroImage*, vol. 16, no 4, p. 1159–1164.
- Morris, Margaret (2018). *Left to our own devices*, (1^e éd.). Cambridge, MIT press, 161 p.
- Mu, Yan, Cindy Cerritos et Fatima Khan (2018). « Neural mechanisms underlying interpersonal coordination: A review of hyperscanning research. », *Social and Personality Psychology Compass*, vol. 12, no 11, doi:10.1111/spc3.12421.
- Mu, Yan, Shihui Han et Michele J. Gelfand (2017). « The role of gamma interbrain synchrony in social coordination when humans face territorial threats. », *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, vol. 12, no 10, p. 1614–1623.
- Mudrik, Liad, Assaf Breska, Dominique Lamy et Leon Y. Deouell (2011). « Integration without awareness: Expanding the limits of unconscious processing. », *Psychological Science*, vol. 22, no 6, p. 764–770.
- Pan, Yafeng, Xiaojun Cheng, Zhenxin Zhang, Xianchun Li et Yi Hu (2017). « Cooperation in lovers: An fNIRS-based hyperscanning study. », *Human Brain*

- Mapping*, vol. 38, no 2, p. 831–841.
- Pérez, Alejandro, Manuel Carreiras et Jon-Andoni Duñabeitia (2017). « Brain-To-brain entrainment: EEG interbrain synchronization while speaking and listening. », *Scientific Reports*, vol. 7, no 1, p. 1–12.
- Piggot, Judith, Hower Kwon, Dean Mobbs, Christine Blasey, Linda Lotspeich, Vinod Menon, Susan Bookheimer *et al.* (2004). « Emotional attribution in high-functioning individuals with autistic spectrum disorder: A functional imaging study. », *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, vol. 43, no 4, p. 473–480.
- Pinker, Steven et Michael T. Ullman (2002). « The past and future of the past tense. *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 6, no 11, p. 456–463.
- Reiss, Allan L. (2004). « An Experiment of Nature: Brain Anatomy Parallels Cognition and Behavior in Williams Syndrome. », *Journal of Neuroscience*, vol. 24, no 21, p. 5009–5015.
- Riedl, René et Pierre-Majorique Léger (2016). *Fundamentals of NeuroIS*, (1^e éd.). Berlin, Springer, 127 p.
- Ritter, Kathrin, Isabel Dziobek, Sandra Preißler, Anke Rüter, Aline Vater, Thomas Fydrich *et al.* (2011). « Lack of empathy in patients with narcissistic personality disorder. », *Psychiatry Research*, vol. 187, no 2, p. 241–247.
- Rizzolatti, Giacomo et Laila Craighero (2004). « The mirror-neuron system. », *Annual Reviews in Neuroscience*, vol. 27, no 1, p. 169–192.
- Rizzolatti, Giacomo et Maddalena Fabbri-Destro (2008). « The mirror system and its role in social cognition. », *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 18, no 2, p. 179–184.
- Rizzolatti, Giacomo Leonardo Fogassi et Vittorio Gallese (2001). « Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. », *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 2, no 9, p. 661–670.
- Rizzolatti, Giacomo et Corrado Sinigaglia (2015). « Curious book on mirror neurons and their myth. », *JSTOR*, vol. 128, no 4, p. 527-533.
- Rosenzweig, Ephron S. et Carol A. Barnes (2003). « Impact of aging on hippocampal function: plasticity, network dynamics, and cognition. », *Progress in Neurobiology*, vol. 69, no 3, p. 143–179.

- Saito, Daisuke N., Hiroki C. Tanabe, Keise Izuma, Masamichi J. Hayashi, Yusuke Morito, Hidetsugu Komeda *et al.* (2010). « “Stay Tuned”: Inter-Individual Neural Synchronization During Mutual Gaze and Joint Attention. », *Frontiers in Integrative Neuroscience*, vol. 4, no 11, p. 1–12.
- Schippers, Marleen B., Alard Roebroeck, Remco Renken, Luca Nanetti et Christian Keysers (2010). « Mapping the information flow from one brain to another during gestural communication. », *Proceedings of the national Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 107, no 1, p. 9388–9393.
- Schmorrow, Dylan D. et Cali M. Fidopiastis (2011). *Foundations of Augmented Cognition. Directing the Future of Adaptive Systems: 6th International Conference*, (1^e éd.). Orlando, Springer, 669 p.
- Scholkmann, Felix, Lisa Holper, Ursula Wolf et Martin Wolf (2013). « A new methodical approach in neuroscience: assessing inter-personal brain coupling using functional near-infrared imaging (fNIR) hyperscanning. », *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 7, no 11, p. 1–6.
- Sciaraffa, Nicolina, Gianluca Borghini, Pietro Aricò, Gianluca Di Flumeri, Alfredo Colosimo, Anastasios Bezerianos *et al.* (2017). « Brain interaction during cooperation: Evaluating local properties of multiple-brain network. », *Brain Sciences*, vol. 7, no 7, p. 90.
- Senior, Carl et Michael J.R. (2007). *The social cognitive neuroscience of organisation*, (1^e éd.). Oxford, Wiley-Blackwell, 252 p.
- Sinha, Nishant, Tomasz Maszczyk, Zhang Wanxuan, Jonathan Tan et Justin Dauwels (2017). « EEG hyperscanning study of inter-brain synchrony during cooperative and competitive interaction. », *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2016 - Conference Proceedings*, doi:10.1109/SMC.2016.7844990
- Sonenschein, Scott (2007). « The role of construction, intuition, and justification in responding to ethical issues at work: The sensemaking-intuition model. », *Academy of Management Review*, vol. 32, no 4, p. 1022–1040.
- Spence, Charles (2019). « Neuroscience-inspired design: From academic neuromarketing to commercially relevant research. », *Organizational Research Methods*, vol. 22, no 1, p. 275–298.

- Stam, Cornelis J., Guido Nolte et Andreas Daffertshofer (2007). « Phase lag index: assessment of functional connectivity from multi channel EEG and MEG with diminished bias from common sources. », *Human Brain Mapping*, vol. 28, no 11, p. 1178–1193.
- Stevens, Ronald, Trysha Galloway, Peter Wang, Chris Berka, Veasna Tan, Thomas Wohlgemuth, *et al.* (2013). « Modeling the neurodynamic complexity of submarine navigation teams. », *Computational and Mathematical Organization Theory*, vol. 19, no 3, p. 346–369.
- Szymanski, Caroline, Ana Pesquita, Allison A. Brennan, Dionysios Perdikis, James T. Enns, Timothy R. Brick, *et al.* (2017). « Teams on the same wavelength perform better: Inter-brain phase synchronization constitutes a neural substrate for social facilitation. », *NeuroImage*, vol. 152, no 3, p. 425–436.
- Tomlin, Damon, M. Amin Kayali, Brooks King-Casas, Cedric Anen, Colin F. Camerer, Steven R. Quartz *et al.* (2006). « Agent-Specific Responses in the Cingulate Cortex During Economic Exchanges », *Science*, vol. 312, no 5, p. 1047–1051.
- Toppi, Jlenia, Ginaluca Borghini, Manuela Petti, Eric J. He, Vittorio De Giusti, Bin He, *et al.* (2016). « Investigating cooperative behaviour in ecological settings: An EEG hyperscanning study. » *PLoS ONE*, vol. 11, no 4, p. 1–26.
- Toppi, Jlenia, Angela Ciaramidaro, Peter Vogel, Donatella Mattia, Fabio Babiloni, Michael Siniatchkin *et al.* (2015). « Graph Theory in Brain - to - Brain Connectivity : a Simulation Study and an Application to an EEG hyperscanning experiment », *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, doi:10.1109/EMBC.2015.7318830
- Torrence, Christopher et Gilbert Compo (1998). « A practical guide to wavelet analysis. », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 79, no 1, p. 61–78.
- Van Hoorebeke, Delphine (2007). *Contagion émotionnelle facteur modérateur de créativité et de performance de groupe au travail ?*, (1^{ère} ed.). Paris, 9ème Université de printemps de l'IAS, 16 p.
- Waldman, David, M.K. Ward et William J. Becker (2017). « Neuroscience in Organizational Behavior. », *Annual Review of Organizational Psychology and Organizational Behavior*, vol. 4, no 12, p. 425-444.
- Watson, Christa, Fumiko Hoeft, Amy S. Garrett, Scott S. Hall et Alla L. Reiss (2008). «

- Aberrant brain activation during gaze processing in boys with fragile X syndrome. », *Archives of General Psychiatry*, vol. 65, no 11, p. 1315–1323.
- Wight, Richard G., Carol S. Aneshensel, Dana Miller-Martinez, Amanda L. Botticello, Janet R. Cummings, Arun S. Karlamangla *et al.* (2006). « Urban neighborhood context, educational attainment, and cognitive function among older adults. », *American Journal of Epidemiology*, vol. 163, no 12, p. 1071–1078.
- Wilson, Stephen M., Istvan Molnar-Szakacs et Marco Iacoboni (2008). « Beyond superior temporal cortex: Intersubject correlations in narrative speech comprehension. », *Cerebral Cortex*, vol. 18, no 1, p. 230–242.
- Wood, Donna J. et Barbara Gray (1991). « Toward a comprehensive theory of collaboration. », *The Journal of Applied Behavioural Science*, vol. 27, no 2, p. 139–162.
- Woolf, Clifford J. et Michael W. Salter (2000). « Neuronal plasticity: increasing the gain in pain. », *Science*, vol. 288, no 5472, p. 1765–1768.
- Yun, Kyongsik, Dongil Chung et Jaesung Jeong (2008). « Emotional Interaction in Human Decision Making using EEG Hyperscanning. », *Proceedings of the 6th International Conference on Cognitive Science*, vol. 2, no 1, p. 1–4.
- Zatorre, Robert J., R. Douglas Fields et Heidi Johansen-Berg (2012). « Plasticity in gray and white: neuroimaging changes in brain structure during learning. », *Nature Neuroscience*, vol. 15, no 4, p. 528-536.
- Zhou, Guangyu, Mathieu Bourguignon, Lauri Parkkonen et Riitta Hari (2016). « Neural signatures of hand kinematics in leaders vs. followers: A dual-MEG study. », *NeuroImage*, vol. 125, no 1, p. 731–738.

