



**HAL**  
open science

# Apprendre un art ensemble : étude longitudinale d'enregistrements simultanés en électroencéphalographie lors de performances musicales

Michaël Acquadro

## ► To cite this version:

Michaël Acquadro. Apprendre un art ensemble : étude longitudinale d'enregistrements simultanés en électroencéphalographie lors de performances musicales. Sciences cognitives. Université Grenoble Alpes, 2016. Français. NNT : 2016GREAS014 . tel-01529583

**HAL Id: tel-01529583**

**<https://theses.hal.science/tel-01529583>**

Submitted on 31 May 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

### DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Sciences cognitives, psychologie et neurocognition**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

**Michaël ACQUADRO**

Thèse dirigée par **Marco Congedo**

préparée au sein du **Laboratoire GIPSA-lab**  
dans l'**École Doctorale Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement (EDISCE)**

### **Apprendre un art ensemble : étude longitudinale d'enregistrements simultanés en électroencéphalographie lors de performances musicales.**

Thèse soutenue publiquement le « **31 mars 2016** »,  
devant le jury composé de :

**Mme Maureen CLERC**

DR INRIA, Athena project team, Sophia Antipolis

Rapporteur

**Mr Fabrizio DE VICO FALLANI**

Dr., INRIA, ICM, Paris

Rapporteur

**Mr Christian JUTTEN**

Professeur, Gipsa-lab, Grenoble

Président

**Mr Christian MARENDAZ**

Professeur, LPNC, Grenoble

Examineur

**Mr Yves PAULIGNAN**

CR CNRS, L2C2, Lyon

Examineur

**Mr Marco CONGEDO**

CR CNRS, Gipsa-lab, Grenoble

Directeur de thèse





UNIVERSITÉ DE GRENOBLE ALPES  
ÉCOLE DOCTORALE ISCE  
Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement

# THÈSE

pour obtenir le titre de

docteur en sciences

de l'Université Grenoble Alpes

**Mention : Sciences cognitives, psychologie et neurocognition**

Présentée et soutenue par

Michaël ACQUADRO

**Apprendre un art ensemble :  
étude longitudinale d'enregistrements simultanés en  
électroencéphalographie lors de performances musicales.**

Thèse dirigée par Marco CONGEDO  
préparée au laboratoire Gipsa-Lab  
soutenue le 31 mars 2016

## **Jury :**

<i>Rapporteurs :</i>	Maureen CLERC	–	Athena project team
	Fabrizio DE VICO	–	Institut du Cerveau et de la Moelle épinière
	FALLANI		
<i>Directeur :</i>	Marco CONGEDO	–	Gipsa-Lab
<i>Président :</i>	Christian JUTTEN	–	Gipsa-Lab
<i>Examineurs:</i>	Christian MARENDAZ	–	Laboratoire de Psychologie et de NeuroCognition
	Yves PAULIGNAN	–	Laboratoire sur le Langage, le Cerveau et la Cognition



---

**Résumé** – L’objectif de notre recherche est de comprendre les bases cérébrales de l’interaction sociale dans un contexte de performance musicale grâce à des outils issus des neurosciences (électroencéphalographie : EEG) et du traitement du signal. Ce manuscrit présente tout d’abord un état de l’art des études récentes dans le domaine de l’hyperscanning. A sa suite, nous offrons une réflexion sur les prérequis et la méthodologie à adopter pour concevoir une expérience prédisposant à l’émergence d’une synchronisation neuronale. Nous décrivons ensuite la performance musicale comme activité particulièrement adaptée à l’étude de l’interaction sociale. Par la suite nous présentons plusieurs méthodes permettant de calculer des indices de couplage cérébral sur les données récoltées lors d’expériences en hyperscanning. Nous y décrivons en particulier les méthodes de séparation de source conjointe (joint Blind Source Separation - jBSS) dont l’avantage est de se rapprocher d’une réalité anatomique et physiologique, ainsi que de prendre en compte l’information inter-sujets lors de l’estimation des sources. Enfin, nous détaillons notre contribution au champ des neurosciences sociales sous la forme d’une expérience longitudinale en hyperscanning-EEG. Elle étudie l’interaction sociale de pianistes à quatre mains lors de l’apprentissage d’un morceau de musique sur une période de deux mois. Nous mettons en évidence qu’il existe une corrélation entre l’augmentation de la performance musicale au cours du temps, la synchronisation cérébrale et la qualité de la relation entre les musiciens.

**Mots-clés** : hyperscanning-EEG, synchronisation cérébrale, performance musicale, séparation de source conjointe (jBSS), index de couplage, expérience écologique.

---

---

**Abstract** – The aim of our research is to understand the neural bases of social interaction in a musical performance context using tools from neuroscience (electroencephalography: EEG) and signal processing. This manuscript first presents a state of the art of recent studies in the field of hyperscanning. Then, we introduce our recommendations on the prerequisites and methodology to design experiments facilitating the emergence of neuronal synchronization. We argue that musical performance is particularly suited to study social interactions. Subsequently we present several methods to calculate brain coupling on data collected during experiments in hyperscanning. We describe in particular the methods of joint Blind Source Separation (jBSS) whose advantages are to approach anatomical and physiological reality, as well as taking into account inter-subject information when estimating sources. Finally, we detail our contribution to the field of social neuroscience with a longitudinal experience in hyperscanning-EEG. We studied social interaction from musicians playing four-hands piano over a two-month period. We highlight a correlation between increased musical performance over time, cerebral synchronization and quality of the relationship between the pianists.

**Keywords** : hyperscanning-EEG, brain synchronization, music performance, joint Blind Source Separation (jBSS), coupling index, ecological experimental design.

---

Gipsa-Lab, 11 rue des Mathématiques, Grenoble Campus BP46, F-38402  
St Martin d’Hères



# Remerciements

A mon sens, la thèse est à l'image de la vie : elle ne peut être réalisée seule même si nous restons malgré tout l'artisan principal de notre propre travail. Comme un tisserand sur son métier à tisser, nous entrecroisons le fil de notre personnalité, de nos émotions et de nos idées avec celui des autres.

Ma tante, Catherine, m'incita peut-être sans le savoir dans le cadre de la thèse. Les lectures qu'elle m'a très régulièrement conseillées, principalement de la science-fiction et du fantastique, m'ont motivé à essayer de comprendre le monde et de rester curieux de tout. Sa fibre scientifique et sa rigueur ont été, et sont encore aujourd'hui, des modèles pour moi. Je souhaite la remercier pour avoir toujours été là dans les moments difficiles et pour son soutien inconditionnel.

Mon directeur de thèse, Marco, m'a aidé à constituer la chaîne de mon travail de thèse. Son encadrement m'a permis de voir les choses que je n'avais pas remarquées au premier regard, et son expérience m'a aiguillé vers les bonnes pistes. Merci à sa présence lors des moments de rush dans la rédaction.

Ma directrice d'école doctorale, Anne, m'a donné une trame dans laquelle je pouvais réaliser ma thèse. Ses conseils diplomatiques et sa disponibilité m'ont été d'une très grande aide, notamment lors de la constitution des divers dossiers, qui ont toujours été un casse-tête pour moi.

Mes collègues de bureau, Christophe et son mental d'acier, Emmanuelle et son rire communicatif, Jonas et ses airs de vieux sage, Antoine dit "l'escroc", Hélène la matriarche, Jeremy et Louis, le barde et le fou du roi. Pendant ces années ils m'ont tous partagé leurs fils multicolores lors des repas ensemble, de la briscola, et des diverses sorties, me permettant d'avancer un peu plus dans mon travail de thèse grâce à leurs réflexions pertinentes et les moments de détente si importants dans tout processus créatif. Je tiens aussi à remercier Alexandre et Florent ; sans leur aide autant technique que tactique je n'aurais pu réaliser mes expériences, ni les analyser. Merci aussi à Mr. Revol ainsi que mes pianistes qui m'ont prodigué leur expertise musicale afin d'apporter de la vie et de la légèreté dans la salle d'expérimentation PerSee.

Mon amie, Carine, m'a offert un fil étrange qui m'a fait comprendre qu'il est parfois possible d'apprendre autant de la présence de quelqu'un, que de son absence. Je la remercie pour son soutien quotidien, son honnêteté et son courage, et surtout son jus d'orange matinal pressé à la main qui m'a laissé un souvenir impérissable. Si aujourd'hui je me sens aussi lié à la musique, c'est sans aucun doute grâce cette rencontre.

Mon amie, Margaux, me confia un fil fait de poussière d'étoiles qui m'a toujours remonté le moral et donné du rêve lorsque j'en avais besoin. Merci à sa bonne humeur et à son dynamisme qui me motivera jusqu'au bout de ma vie à donner le meilleur de moi-même.

Il existe tellement de personnes qui ont contribuées de près ou de loin à la réalisation de cette étoffe, qu'il serait impossible de toutes les citer. Cependant, je voudrais tous les remercier pour leurs partages, les échanges d'idées, et les nouveaux liens et nœuds qui ont été créés.

Le tissage continu, la thèse n'est en fait qu'un motif dans la tapisserie de la vie, et il faut se remettre à créer de la beauté avec nos bobines de fils actuelles, et celles à venir.

# Financement

Les travaux de cette thèse ont été financés en majeure partie par un Contrat Doctoral attribué par l'Ecole Doctorale ISCE pendant une durée de 3 ans.

Nous avons aussi bénéficié du soutien du Pôle Grenoble Cognition en 2013 dans le cadre d'un appel à projet.

Enfin, nos travaux ont également reçu le support financier du projet européen ERC-2012-AdG-320684-CHESS sur la multimodalité.

# Table des matières

Résumé.....	i
Remerciements.....	iii
Financement.....	iv
Table des matières.....	v
Table des figures.....	vii
Table des tables.....	viii
<b>Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I. Hyperscanning: un outil de la coordination sociale</b> .....	<b>7</b>
I. Introduction, l'approche multi-cerveau.....	9
II. Etat de l'art en hyperscanning.....	14
a. Etudes en observation .....	14
b. Etudes en tour-par-tour .....	16
c. Etudes en interaction continue .....	21
III. Conclusion .....	30
<b>Chapitre II. Méthodologie en Hyperscanning</b> .....	<b>31</b>
I. Conception expérimentale .....	33
a. La validité écologique .....	33
b. La composante émotionnelle.....	35
c. Le design longitudinal.....	37
II. Performance musicale .....	39
a. La musique, au centre de la cognition .....	39
b. Les origines.....	42
c. Les émotions .....	45
d. Performance, expertise et entraînement .....	48
III. Conclusion .....	49
<b>Chapitre III. Méthodes d'analyse des données d'Hyperscanning en EEG</b> .....	<b>53</b>
I. Introduction : la notion de synchronie .....	55
II. Introduction à l'électroencéphalographie.....	58
III. Mesure du couplage cérébral .....	60
a. Cohérence et Phase Locking Value .....	60
b. Limites .....	61
IV. La jBSS en hyperscanning.....	64
a. La séparation de source aveugle et conjointe .....	64
b. Limitations.....	69
V. Conclusion.....	69
<b>Chapitre IV. Etude de la synchronisation cérébrale au cours du temps dans un contexte musical</b> .....	<b>71</b>
I. Introduction .....	73
a. Outils et contexte expérimental.....	74
b. Définition des objectifs .....	75
II. Présentation de l'expérience.....	76
a. Participants et experts .....	76
i. Pianistes .....	76
ii. Expert .....	77

b.	Matériel et méthode .....	77
i.	Instrument de musique et enregistrements .....	77
ii.	Partitions .....	78
iii.	Mesures comportementales .....	79
iv.	Mesure électroencéphalographique .....	80
c.	Protocole expérimental .....	81
III.	Analyses des données expérimentales .....	85
a.	Résultats comportementaux .....	85
i.	Exploration des données .....	86
ii.	Performance musicale objective .....	87
iii.	Analyse des questionnaires et analyse en composante principale .....	88
b.	Résultats en EEG .....	90
i.	Méthode .....	92
ii.	Résultats .....	95
c.	Corrélation entre l'EEG et les données comportementales .....	102
IV.	Discussion .....	102
V.	Conclusion .....	111
<b>Chapitre V. Conclusion générale et perspectives .....</b>		<b>113</b>
I.	Discussion générale .....	115
II.	Perspectives .....	119
III.	Note finale .....	120
<b>Références .....</b>		<b>121</b>
<b>Annexes .....</b>		<b>139</b>
6.1	Questionnaires session .....	141
6.2	Questionnaires empathie .....	144
6.3	ANOVA à mesures répétées sur la performance musicale .....	157
6.4	Analyse en composante principale .....	158
6.5	Résultats de la synchronisation cérébrale avec la PLV, Duo vs Solo .....	159
6.6	Analyses de la puissance des sources en intra-individu, Duo vs Solo .....	161
6.7	Fonctions de combinaison de valeur p .....	162
6.8	Analyses de la puissance des sources en intra-individu, HQ vs NQ .....	163
6.9	Echantillon des tracés EEG .....	165
6.10	Echantillon des tracés des sources non filtrées et filtrées, et cohérence .....	170

# Table des figures

1.1 Illustration du système des neurones miroirs (MNS) et du réseau de mentalisation (MENT).....	10
1.2 Exemple d'une activité écologique présentant les trois types d'interaction .....	12
1.3 Représentation du paysage expérimental des neurosciences sociales.....	13
1.4 Régions cérébrales présentant une corrélation significative ( $p < 0.05$ ) entre l'ISC et la valence / intensité auto-rapportées .....	15
1.5 Corrélogrammes du signal "d'intention de confiance" du noyau caudé par rapport à l'activité du cortex cingulaire moyen (MCC) de l'investisseur et du cortex cingulaire antérieur (ACC) du partenaire .....	17
1.6 Expérience effectuée en hyperscanning en utilisant plusieurs dispositifs EEG à haute résolution lors d'un jeu de cartes .....	19
1.7 Echantillons d'épisodes d'imitations spontanées dans la dyade n ° 3 montrant la correspondance entre les synchronies issues de l'interaction et l'activité cérébrale.....	23
1.8 Les avantages de l'EEG en tant que modalité de neuroimagerie .....	25
2.1 Taxonomie de différents designs expérimentaux en interaction musicale.....	35
2.2 Les avantages de la performance musicale au cours du temps en tant que paradigme expérimental pour étudier les interactions sociales en neuroscience.....	39
2.3 Régions cérébrales clés associées à l'activité musicale.....	41
3.1 Types de synchronisation .....	57
3.2 Schéma du mélange des sources cérébrales sur les électrodes .....	59
4.1 Vue schématique du dispositif expérimental .....	78
4.2 Extrait de partition de « Danse Hongroise n°5 » de Johannes Brahms pour piano à quatre mains .....	79
4.3 Montage EEG utilisé lors de l'expérience.....	81
4.4 Moyenne des scores de proximité par duo en fonction des sessions.....	86
4.5 Graphique de la moyenne de la performance musicale en fonction des sessions .....	87
4.6 Localisation et spectre des sources d'intérêt par session et par pianiste dans le duo n°IV .....	96
4.7 Logarithme de la puissance intra-individuelle de chaque pianiste pour la source sélectionnée en fonction des sessions, selon chaque condition et sur chaque trial .....	97
4.8 Valeurs p issues des comparaisons et tests de permutation entre conditions contrôles et expérimentales en fonction des sessions.....	99
4.9 Cohérence calculée sur les sources sélectionnées en fonction de chaque session, selon chaque condition expérimentale .....	100
4.10 Trace EEG du duo n°IV dans la session 6 en condition duo. ....	103
4.11 Trace des sources non filtrées, filtrées entre 4-7Hz et de la cohérence du duo n°IV dans les sessions 2 et 6 en condition duo.....	104
4.12 Moyenne de la composante de la Qualité de la relation en fonction des sessions et selon le duo.....	107
4.13 Photographie du protocole expérimental lors de la réalisation d'un morceau à quatre mains .....	109

# Table des tables

Tableau 1.1 Résumé des études en hyperscanning selon la modalité, le type de stimuli, le type d'interaction, et les méthodes d'analyses utilisées .....	29
Tableau 4.1 Design expérimental, exemple de mise en œuvre .....	82
Tableau 4.2 Exemple de calendrier type pour un duo de pianiste .....	85
Tableau 4.3 Matrice des composantes après rotation varimax.....	89

# Introduction



# Introduction

*“Sur un schéma où chaque être humain est un point, il faut dessiner des flèches allant de l’un à l’autre, et de l’autre à l’un. La réalité d’une collectivité est dans l’entrelacs de ces flèches.”*

*“Je suis les liens que je tisse avec les autres.”*

- Albert Jacquard

Il est possible de considérer l’humanité comme l’ensemble des êtres humains, un être collectif, mais aussi comme une entité morale avec une forte attitude pro-sociale. Faire preuve d’humanité démontre une disposition à la compréhension et à faire preuve de compassion envers ses pairs (définition Larousse). Quelle que soit sa désignation, l’humanité n’existe que par les relations que l’Homme tisse avec ses semblables.

Les comportements et les attitudes dans les relations avec autrui, telle que l’empathie, l’altruisme, la violence, l’obéissance ou encore la coopération, sont le sujet d’étude des neurosciences sociales. Le but de cette discipline est de mettre en évidence les mécanismes neuronaux sous-jacents lors d’interactions sociales. Pour réaliser cet objectif, il est nécessaire d’étudier l’être humain dans des situations favorables de manière à ce que des phénomènes aussi complexes aient lieu de façon naturelle. Autrement dit, il faut opérer à un changement de paradigme par rapport aux neurosciences classiques : étudier l’être humain en situation sociale avec un autre de ses congénères plutôt qu’en isolation (Dumas et al., 2014; Hari & Kujala, 2009; Schilbach et al., 2012; Sebanz et al., 2006).

L’étude de l’être humain face à des stimuli sociaux a permis de mettre indirectement en évidence l’existence de deux réseaux cérébraux mis en jeu dans la compréhension de ses congénères. En premier lieu, le système des neurones-miroirs (MNS) facilitant les processus inconscients de partage et d’imitation des comportements d’autrui, il permet aussi d’anticiper les intentions de ses pairs (Aglioti et al., 2008; Kilner & Friston, 2014; Maranesi et al., 2014; Southgate et al., 2009). Et deuxièmement, le réseau de mentalisation (MENT) regroupant les mécanismes mentaux conscients ayant pour objectifs de comprendre et d’inférer les états affectifs, les intentions et les croyances d’autrui (Christov-Moore et al., 2014). Ces réseaux pourraient avoir un rôle dans les événements d’imitation spontanée entre individus, comme par exemple dans le cas de protrusion de la langue, de protrusion des lèvres, et d’ouverture de la bouche chez le bébé de deux semaines lorsqu’il observe un adulte faire ces mouvements (Meltzoff & Moore, 1977). Ces événements d’imitation spontanée impliquent une opération assez similaire chez les deux personnes concernées,

ne serait-ce que pour la production motrice du geste (Decety et al., 2002). Ainsi, dans le cas où quelqu'un "ressent" par empathie les états affectifs d'autrui, il est possible que les cerveaux des deux protagonistes se "synchronisent" car ce comportement social nécessite un fort degré de similitude dans le traitement cérébral associé (Babiloni et al., 2012; Overy & Molnar-Szakacs, 2009; Singer et al., 2004).

Aussi, une technique appelée "hyperscanning" pourrait aider à mettre en évidence les mécanismes cérébraux sous-jacents lors de tels comportements sociaux. Le terme "hyperscanning" vient d'une étude en imagerie fonctionnelle par résonance magnétique (IRMf) réalisée par Montague (2002) visant à examiner les processus cérébraux mis en jeu lors d'une tâche de confiance/supercherie. Cette expérience a permis de diffuser cette technique d'enregistrements simultanés dans la communauté scientifique, en faisant un outil particulièrement adapté à l'étude des processus cérébraux engagés lors d'interactions sociales. De nos jours, elle est utilisée avec d'autres modalités de neuroimagerie comme l'électroencéphalographie (EEG) (Astolfi et al., 2011; Dumas et al., 2010; Müller et al., 2013) ou la spectroscopie infrarouge proche (NIRS) (Cui et al., 2012; Holper et al., 2012; Osaka et al., 2015), permettant de réaliser des expériences de plus en plus proches de la vie quotidienne.

Les travaux de cette thèse suivent directement la nouvelle ligne de conduite empruntée en neurosciences sociales décrite précédemment. Ainsi, nous avons souhaité contribuer expérimentalement à ce champ disciplinaire en étudiant le couplage cérébral entre deux pianistes, alors qu'ils apprennent un morceau de musique ensemble. La caractérisation des aires cérébrales en synchronie peut nous aider à comprendre les processus mis en jeu lors de la création d'une relation de coordination fine.

Pour réaliser une telle entreprise, nous avons dû adopter une démarche pluridisciplinaire en faisant appel à des outils issus de la psychologie, des neurosciences, de la musicologie et du traitement du signal. Les chapitres de cet ouvrage sont basés sur les notions issues de ces disciplines, et même si les trois premiers peuvent être lus indépendamment les uns des autres, ils suivent une suite logique pour aboutir à la conception de notre expérience. Chaque partie étant suffisamment introduite et discutée, nous ne les approfondissons pas plus dans cette introduction. Ainsi, le manuscrit suit l'organisation suivante :

- Le premier chapitre, "Hyperscanning : un outil de la coordination sociale", présente un état de l'art des études réalisées en hyperscanning, organisé en fonction des types d'interactions et de la modalité de neuroimagerie empruntée. Ce chapitre nous permet d'examiner les

divers paradigmes expérimentaux utilisés dans la littérature ainsi que d'identifier les structures et réseaux impliqués dans le couplage cérébral.

- Le second chapitre, "Méthodologie en Hyperscanning", offre une réflexion sur la façon la plus adaptée de concevoir une expérience en hyperscanning de manière à faciliter l'émergence d'un couplage cérébral. Nous en déduisons que la performance musicale présente un cadre adéquat et écologique pour l'étude de la synchronisation cérébrale lors d'interactions sociales et offrons une introduction à la musique en tant que construit social de l'humanité. Cette section a pour rôle de comprendre quelles sont les aires cérébrales mises en jeu lors de sa production et de son écoute d'un point de vue émotionnel, ainsi que ses effets sur le cerveau suite à sa pratique prolongée.
- Le troisième chapitre, "Méthodes d'analyses des données d'Hyperscanning en EEG", dépeint les ressources matérielles et analytiques employées dans la thèse. Nous introduisons l'EEG en tant que modalité de neuroimagerie adaptée pour la récolte de donnée en hyperscanning, puis décrivons des méthodes issues du traitement du signal permettant de calculer le couplage cérébral. Nous mettons l'accent sur les avantages des outils de la séparation de sources conjointe (jBSS) dans l'analyse des signaux récoltés en EEG en hyperscanning. Notre étude est la première qui utilise cette méthode.
- Le quatrième chapitre, "Etude de la synchronisation cérébrale au cours du temps dans un contexte musical", présente notre étude longitudinale en hyperscanning-EEG. Notre expérience est la première à étudier la création et l'évolution d'une synchronisation cérébrale entre pianistes à quatre mains au cours du temps, son lien avec la performance musicale et la qualité de la relation entre participants. Sa conception et l'interprétation des résultats a été possible grâce à l'étude de la littérature dans le premier chapitre et la réflexion issue du second chapitre ; son analyse s'est faite avec les outils du troisième chapitre.
- Pour terminer, le cinquième chapitre conclut brièvement nos résultats et réflexions sur l'interaction sociale humaine, et ouvre le champ des perspectives sur son étude dans le domaine des neurosciences sociales.



# **Chapitre I. Hyperscanning: un outil de la coordination sociale**



# Hyperscanning: un outil de la coordination sociale

---

## I. Introduction: l'approche multi-cerveau

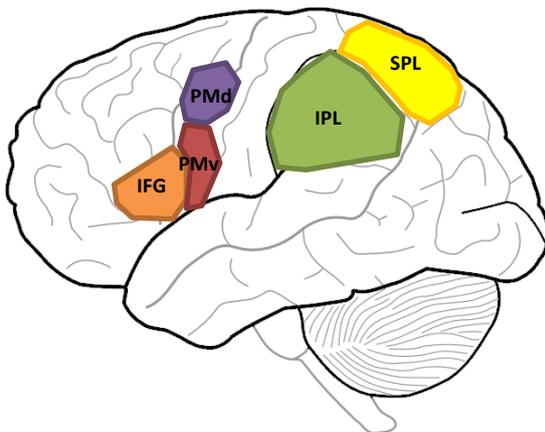
L'étude de l'organisation du comportement humain en situation sociale est extrêmement complexe. Elle repose à la fois sur la compréhension individuelle de chaque entité composant la relation sociale, et sur l'analyse de la dynamique de leur interaction qui est le produit d'une combinaison d'individus spécifiques dans un contexte particulier. Le but des neurosciences sociales est de mettre en évidence les bases neuronales selon ces deux perspectives. C'est-à-dire de quelle manière le cerveau est préparé à de tels comportements sociaux, grâce à quelles caractéristiques cérébrales spécifiques (i.e., anatomique, fonctionnelle), et de quelle manière leurs fonctionnements évoluent au cours du temps en situation sociale. De ces phénomènes peuvent résulter une *émergence d'états de couplages cérébraux* (Frith & Frith, 2012; Hasson, et al., 2012; Ochsner & Lieberman, 2001; Stephens et al., 2010).

Avant le développement du langage, le principal moyen par lequel les nourrissons peuvent communiquer avec les autres humains dans leur environnement proche, y compris leurs parents, est en "lisant" leurs visages. Non seulement il est important pour les enfants de discriminer les individus familiers des inconnus, mais il est aussi crucial pour eux d'obtenir des informations sur leurs émotions et intentions. L'ajustement ontogénétique du cerveau en développement par rapport aux émotions et autres signaux sociaux commence donc dès la naissance avec l'émergence anatomique d'un réseau (amygdale, cortex orbito-frontal, sillon temporal supérieur, gyrus fusiforme) permettant la reconnaissance des différentes expressions émotionnelles à partir de l'âge de 5-7 mois (Leppänen & Nelson, 2009).

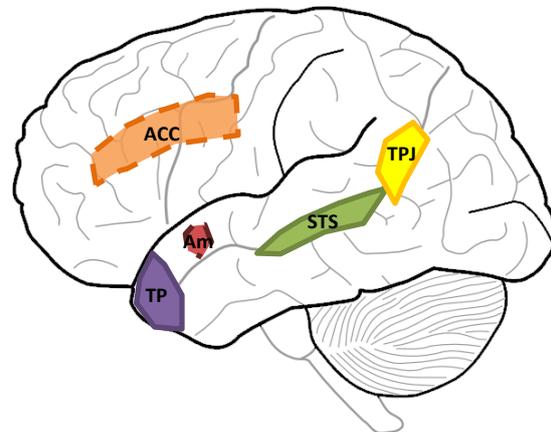
Chez les adultes il existe deux systèmes distincts prenant part dans l'interaction sociale : le système des neurones-miroirs (MNS) et le système de mentalisation (MENT). Le MNS comprend les processus et mécanismes inconscients facilitant le partage et l'imitation du comportement des autres, tandis que le MENT implique des processus mentaux délibérés et conscients visant à inférer les états affectifs, comportementaux, les intentions et croyances d'autrui lors d'interactions sociales

(Christov-Moore et al., 2014). Le MNS permet également de prévoir les intentions des autres (Aglioti, et al., 2008; Kilner & Friston, 2014; Maranesi, et al., 2014; Southgate et al., 2009). Selon 125 études en IRMf, ses substrats anatomiques chez l'être humain semblent être basés dans le lobe pariétal inférieur, le cortex ventral prémoteur, le gyrus frontal inférieur, le cortex dorsal prémoteur et le lobe pariétal supérieur (Molenberghs et al., 2012). Le MENT, quant à lui est constitué du sillon temporal supérieur (STS), du cortex cingulaire antérieur (ACC), de la jonction temporo-occipitale (BA 37), du pôle temporal et de l'amygdale (Christov-Moore et al., 2014; Molenberghs et al., 2012) (**Figure 1.1**). Les fonctions du réseau MENT pourraient avoir émergées en partie comme forme de contrôle contextuel du MNS (Christov-Moore et al., 2014). Discerner les états internes d'autrui avec précision, ainsi qu'inférer leurs intentions en se basant sur leurs comportements observés repose sur l'interaction fine entre ces deux réseaux (Zaki & Ochsner, 2012). En effet, le MNS et le MENT permettent aux individus de se rappeler des expériences et comportements passés, prédire les conséquences de leurs propres actions ainsi que celles des autres, et de choisir d'échanger selon le contexte émotionnel et comportemental de leurs pairs (Christov-Moore et al., 2014). Notons cependant que, bien que la littérature sur ces deux systèmes soit assez fournie, certaines études récentes remettent en question l'existence du MNS chez l'être humain (Lingnau et al., 2009).

## Mirror Neuron System



## Mentalizing Network



**Figure 1.1 Illustration du système des neurones miroirs (MNS) et du réseau de mentalisation (MENT)**

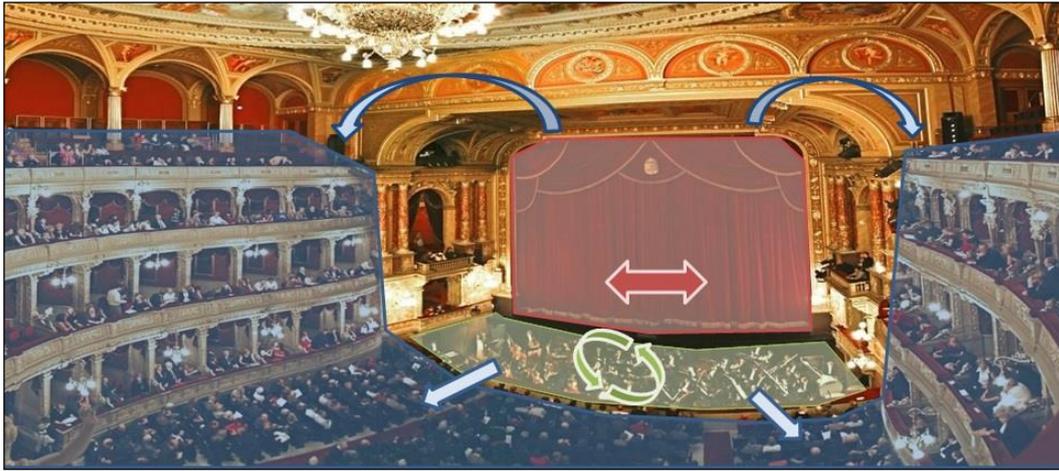
A gauche, les structures cérébrales impliquées dans le MNS : gyrus frontal inférieur (IFG), cortex prémoteur ventral (PMv) et dorsal (PMd), le lobe pariétal inférieur (IPL) et supérieur (SPL). A droite, les structures cérébrales impliquées dans le MENT : le cortex cingulaire antérieur (ACC) en transparence, l'amygdale (Am) en transparence, le pôle temporal (TP), le sillon temporal supérieur (STS) et la jonction temporo-pariétale (TPJ).

L'étude de l'émergence d'états de couplages cérébraux est apparue récemment grâce au développement d'une technique appelée "hyperscanning" permettant l'enregistrement cérébral simultané de deux individus ou plus lors d'interactions sociales (Astolfi et al., 2011; Babiloni et al., 2012; Cui et al., 2012; Dumas et al., 2010; Montague, 2002; Sängér et al., 2012). Depuis, les études

en hyperscanning ont utilisé différentes modalités de neuroimagerie telle que l'IRMf (King-Casas et al., 2005; Krill & Platek, 2012; Lee, 2015; Montague, 2002; Redcay et al., 2010; Tomlin et al., 2006), l'électroencéphalographie (EEG : Astolfi et al., 2011; Babiloni et al., 2006; Dumas et al., 2010; Fallani et al., 2010; Kawasaki et al., 2013; Lindenberger et al., 2009; Müller & Lindenberger, 2014; Yun et al., 2008) et la spectroscopie proche infrarouge (NIRS : Cheng et al., 2015; Cui et al., 2012; Dommer et al., 2012; Funane et al., 2011; Holper et al., 2012; Jiang et al., 2012). Pour ces études en neurosciences sociales, plusieurs auteurs ont recommandé l'utilisation de stimuli socialement et phylogénétiquement pertinents comme des visages humains (Gamer & Büchel, 2009; Haxby et al., 2000) et la perception du regard (Pelphrey et al., 2004). Ces types de stimuli sociaux peuvent changer d'état rapidement (Littlewort et al., 2006), tout comme des comportements sociaux émergents comme la prise de rôle (Reed et al., 2006) ou le leadership (Van Knippenberg, 2011). La variété des modalités de neuroimagerie nous fournit des informations complémentaires sur le fonctionnement cérébral grâce aux différentes résolutions spatiales et temporelles (Hari & Parkkonen, 2015). Cependant seuls l'EEG et la magnétoencéphalographie (MEG) sont capables de capturer les changements d'état à l'échelle de la milliseconde, nous permettant d'étudier la dynamique fine des interactions sociales à l'échelle temporelle appropriée. De plus, les enregistrements EEG peuvent être réalisés dans des situations écologiques plus poussées qu'avec n'importe quelle autre modalité, à l'exception de la NIRS qui partage cette caractéristique. En effet, un facteur important du comportement social provient du contexte dans lequel il se déroule. L'utilisation de designs expérimentaux permettant une interaction écologique entre participants a été fortement recommandée par plusieurs auteurs (Di Paolo & De Jaegher, 2012; Hari & Kujala, 2009; Schilbach et al., 2012).

Les interactions sociales peuvent être catégorisées selon trois niveaux différents : l'observation, l'interaction au tour-par-tour et l'interaction continue (**Figure 1.2**). Chaque catégorie possède son propre rôle dans le décryptage des marqueurs physiologiques de l'interaction sociale, mais l'interaction continue y possède un rôle privilégié.

- Dans la condition d'observation, un individu en isolation est confronté à des indices sociaux alors que les chercheurs mesurent ses réactions et comportements. Celle-ci a été largement étudiée depuis la naissance des neurosciences sociales et a été cruciale pour l'étude du MNS et du MENT (Adolphs, 2002a; Decety et al., 2002; Pelphrey et al., 2004; Wicker et al., 2003).

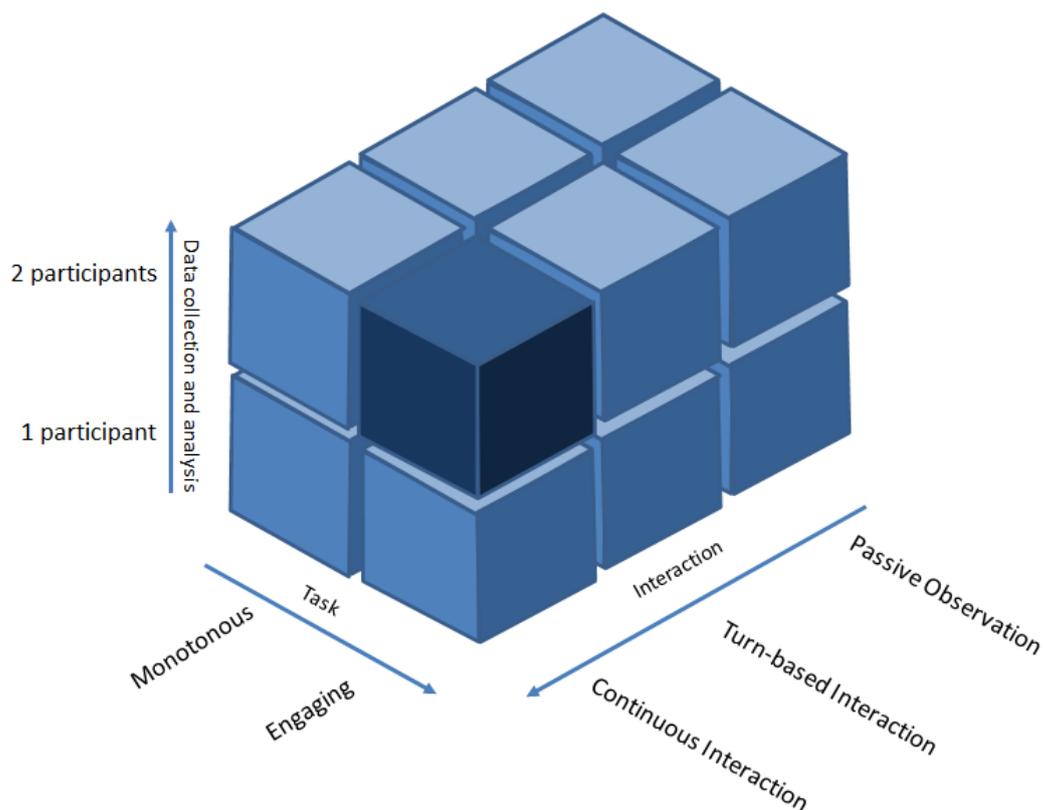


**Figure 1.2 Exemple d'une activité écologique présentant les trois types d'interaction.**

Les trois niveaux d'interaction sont présents lors d'un opéra. Les acteurs (zone rouge) interagissent entre eux en *tour-par-tour*, les uns après les autres, en chantant et récitant leur texte (flèches rouges). L'orchestre (zone verte) accompagne la performance, chaque musicien *interagissant continuellement* les uns avec les autres pour produire de la musique (flèches vertes). Le public (zone bleu) assiste à la performance des acteurs et des musiciens (stimuli audio-visuels) en *condition d'observation* (flèches bleues).

- Dans l'interaction au tour-par-tour, deux individus ou plus interagissent en communiquant sur des tâches requérant un mode d'interaction successif. Cette catégorie a fait l'objet d'études récentes grâce à la technique d'hyperscanning, rendant possible l'enregistrement simultané de plusieurs individus, dans des activités telles que jouer aux cartes (Babiloni et al., 2006), des jeux de transactions économiques et de confiance (Fallani et al., 2010; King-Casas et al., 2005; Montague, 2002) ainsi que dans la parole (Kawasaki et al., 2013).
- Dans l'interaction continue, deux individus interagissent dynamiquement avec peu de contraintes expérimentales, soit en agissant en même temps, soit en s'échangeant arbitrairement leurs rôles à un rythme rapide. L'avantage de ce mode d'interaction sociale et qu'elle se rapproche fortement du comportement quotidien des êtres humains, comme celui de la conversation (Jiang et al., 2012), nous permettant ainsi de l'étudier dans des conditions écologiques. Ce paradigme a été utilisé dans peu d'études pour le moment (Astolfi et al., 2011; Babiloni et al., 2012; Babiloni et al., 2006; Müller & Lindenberger, 2014; Müller et al., 2013), en partie à cause de la difficulté de concevoir des expériences équilibrant environnement écologique avec un contrôle expérimental suffisant, du choix restreint des modalités de neuroimagerie capable d'enregistrer des signaux à l'échelle de la milliseconde, ainsi que du manque de méthodes standards dans la littérature pour analyser des données récoltées en hyperscanning.

La **Figure 1.3** décrit le paysage expérimental actuel des neurosciences sociales selon le type d'interaction que nous venons d'énumérer. L'objectif de ce chapitre est de discuter des différents facteurs à prendre en compte, et que nous considérons comme importants, lorsque nous devons concevoir une expérience en hyperscanning. Nous allons tout d'abord faire la revue de la littérature en hyperscanning selon les types d'interactions et de modalités de neuroimagerie. Ensuite, nous fournissons des arguments en faveur des *paradigmes écologiques*, pour encourager l'étude des *composantes émotionnelles* dans l'interaction sociale et pour l'emploi d'*études longitudinales*. Ces deux dernières caractéristiques ont été malheureusement peu utilisées dans la littérature en hyperscanning. Basé sur ces prémises, nous soutenons que la performance musicale est un cadre expérimental adéquat pour l'hyperscanning et que, pour de telles études, l'EEG est un choix approprié en termes de modalité d'exploration cérébrale.



**Figure 1.3 Représentation du paysage expérimental des neurosciences sociales. Adapté de Schilbach et al. (2012).**

Les cubes représentent les différentes catégories d'expériences des neurosciences sociales selon trois axes: 1) la manière d'enregistrer les données et de faire leurs analyses (de une à deux personnes: hyperscanning); 2) l'engagement des participants dans l'activité expérimentale de monotone à engageante (i.e., engagement émotionnel, signification écologique, étude longitudinale); 3) le degré d'interaction allant de l'observation passive, en passant par l'interaction au tour-par-tour, jusqu'à l'interaction continue. La partie la plus sombre du schéma représente la "matière noire" des neurosciences sociales, celle qui a été le moins explorée et dont nous possédons le moins de données. Nous pensons que la performance musicale en tant que paradigme d'hyperscanning pourrait nous permettre d'explorer cette zone plus en profondeur.

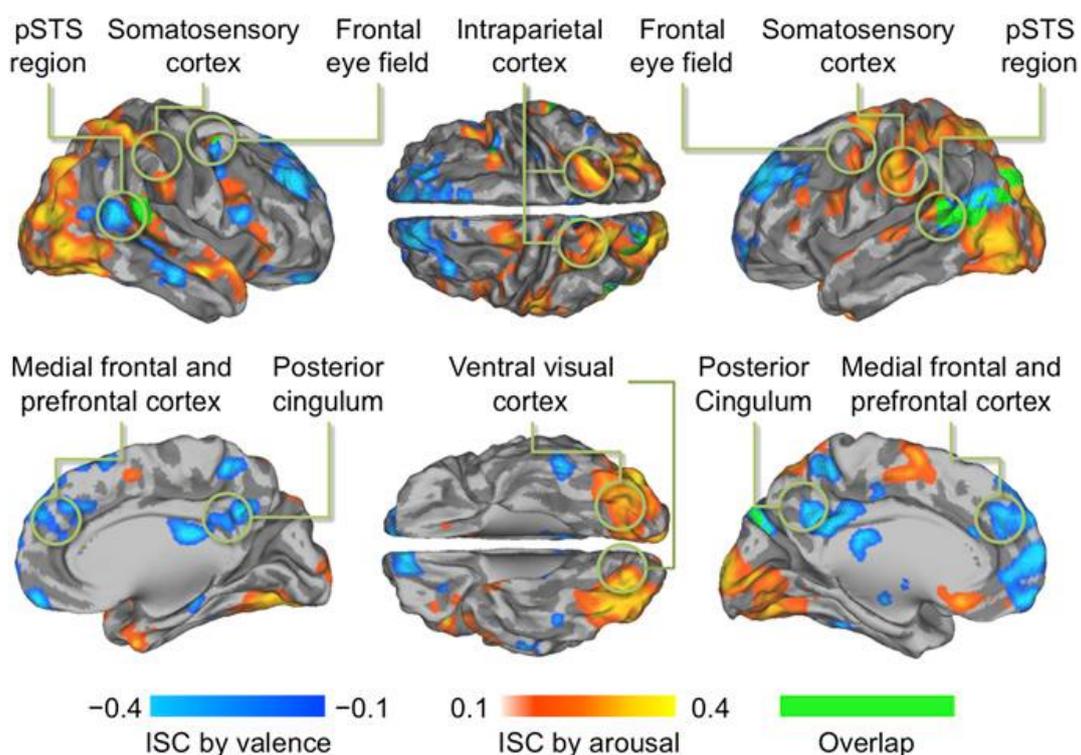
## II. Etat de l'art en hyperscanning

### a. Etudes en observation

Comme nous l'avons présenté dans la **Figure 1.2**, le cas bleu, il existe des études qui ont pour but d'observer les similitudes de traitement chez plusieurs observateurs lors de l'exposition à des stimuli sociaux. Ces expériences ont essentiellement été réalisées en IRM fonctionnelle, et n'empruntent pas l'interaction directe de sujet à sujet. Elles n'utilisent donc pas l'hyperscanning au sens d'enregistrements simultanés de participants, mais plutôt dans le traitement conjoint des données récoltées, et fournissent tout de même des informations pertinentes pour l'étude de l'interaction sociale.

Hasson et al. (2004) s'intéressèrent à la vision naturelle de films et de l'activité conjointe qu'il pouvait en résulter chez plusieurs personnes alors qu'elles observaient les mêmes scènes d'un film connu ("Le bon, la brute et le truand", 1966, Sergio Leone, Produzioni Europee Associati). Chaque participant était scanné séparément à différents moments dans un IRMf et par conséquent l'analyse par corrélation hémodynamique fut réalisée hors ligne. Les auteurs découvrirent que malgré la grande liberté d'exploration visuelle de scènes complexes et la longueur de la séquence (30 minutes), certaines aires cérébrales (sillon supérieur temporal (STS) et latéral (LTS), gyrus rétrosplénial (RS), aires multimodales, gyrus fusiforme) des différents participants s'activaient en même temps de façon synchrone selon le même schéma spatio-temporel (Hasson et al., 2004). Ces résultats soulevèrent deux remarques : il existerait des synchronisations cérébrales aux mêmes instants chez des sujets scannés à différents moments qui pourraient être dues par exemple à la saillance particulière d'un stimulus (i.e., un visage) ; et deuxièmement, il n'y avait pas de structures frontales impliquées dans le traitement du film. Jääskeläinen et collègues (2008) s'interrogèrent sur ce fait, et firent l'hypothèse que les participants n'avaient probablement pas eu le temps de s'engager d'un point de vue cognitif et émotionnel dans le film. Ils décidèrent d'utiliser une œuvre plus engageante émotionnellement ("Crash", 1996, Paul Haggis, Yari Film Group, DEJ Productions) et de surcroît, de la montrer en totalité aux sujets : les premières 72 minutes en dehors de l'IRMf, et les dernières 36 minutes à l'intérieur. Les analyses de corrélation entre sujet de voxel à voxel et en composantes principales (ICA) purent mettre en évidence une corrélation intersujet entre plusieurs structures corticales et sub-corticales dont l'amygdale, et une prédominance dans le cortex préfrontal droit. Cependant, ils furent dans l'impossibilité d'attribuer ces découvertes au fait que les participants avaient eu le temps de s'engager cognitivement et émotionnellement dans le film du fait que les mesures auto-rapportées de valence et d'intensité émotionnelles n'étaient corrélées avec l'activité cérébrale que

chez certains sujets et pas d'autres. L'étude menée par Nummenmaa (2012) adressa ce point, non pas en prenant la totalité d'un film, mais en utilisant des clips de films connus (i.e., "Le parrain" (1972), Francis Ford Coppola, Paramount Pictures, Alfran Productions ; "Quand Harry rencontre Sally" (1989), Rob Reiner, Castle Rock Entertainment, Nelson Entertainment) d'environ 90 secondes avec trois composantes émotionnelles : déplaisant, neutre et plaisant. Les volontaires furent scannés les uns après les autres et on leur demanda d'évaluer la valence et la force de leurs émotions après avoir vu les clips. Les données furent analysées grâce à une toolbox de corrélation inter-sujet (ISC) développée par le même groupe d'auteur précédent (Kauppi et al., 2010), ainsi qu'une corrélation de Pearson. Nummenmaa et collègues trouvèrent que plus l'intensité de l'émotion était en accord entre les participants, plus l'ISC était élevée dans les cortex somatosensoriels, ainsi que dans le réseau visuo-attentionnel dorsal (**Figure 1.4**). La valence négative des émotions fut associée avec une haute ISC dans les régions de traitement de l'émotion telle que le thalamus, le cortex cingulaire antérieur, le mésencéphale, le cortex insulaire et le striatum ventral (Nummenmaa et al., 2012). Les auteurs conclurent que les émotions pouvaient être un catalyseur de la synchronisation cérébrale et comportementale entre les individus.



**Figure 1.4 Régions cérébrales présentant une corrélation significative ( $p < 0.05$ ) entre l'ISC et la valence / intensité auto-rapportées (Nummenmaa et al., 2012).**

Les scores de valence sont représentés de bleu à turquoise et les scores d'intensité de rouge à jaune. On remarque que l'intensité est reliée à des processus au niveau du réseau visuo-attentionnel ventral, ce qui laisse supposer qu'un stimulus à haute intensité émotionnelle pourrait jouer un rôle dans la direction de l'attention de l'individu. La valence émotionnelle est quant à elle impliquée dans des structures traitant l'émotion, ce qui pourrait offrir un cadre affectif permettant l'interprétation des états et intentions d'autrui.

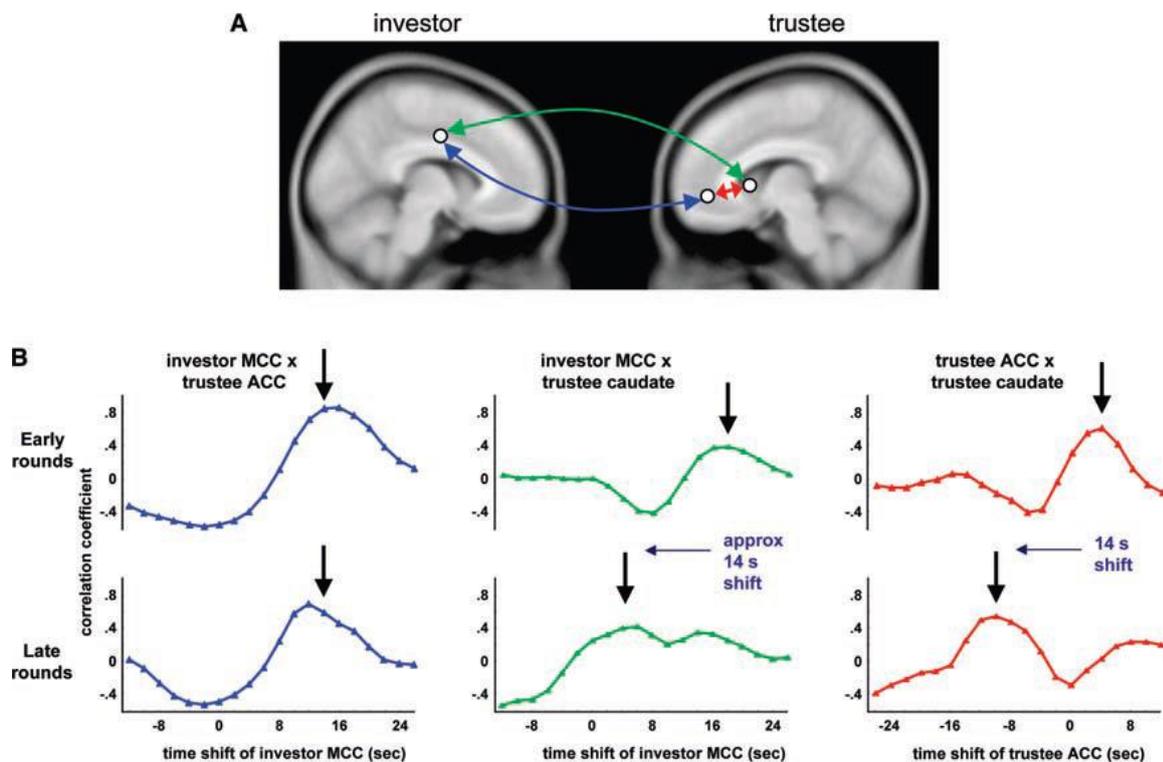
Ces quelques études en IRMf étudièrent un sujet important dans l'interaction d'être humain à être humain : les émotions. La plupart des contacts que l'on a avec d'autres personnes au cours d'une journée ou de notre vie sont teintés d'émotions ou de sentiments, que ce soit dû à cette personne où un stimulus/environnement tiers. Le fait de considérer les émotions comme catalyseur de l'interaction sociale et de synchronisation cérébrale est une notion très importante sur laquelle nous discuterons plus tard dans ce chapitre.

## **b. Etudes en tour-par-tour**

Les études en tour-par-tour s'inscrivent dans le cas rouge de notre schéma (**Figure 1.2**). Elles assignent des rôles prédéfinis aux participants et les alternent selon une fréquence et un rôle prédéfini par les expérimentateurs. Leur objectif est de mettre les individus dans des situations sociales plus proches de la réalité tout en offrant un cadre expérimental suffisamment contrôlé permettant une analyse des données plus aisée. Il s'agit là d'une étape cruciale dans les neurosciences sociales et l'étude de l'interaction sociale car on inclut ici directement un autre être humain avec toute sa complexité dans le cadre expérimental, jouant le rôle à la fois de participant et de stimulus.

Le terme hyperscanning provient d'une étude proposée par Montague et al. (2002) utilisant deux IRMf comme modalité de neuroimagerie. Les participants devaient réaliser une tâche de confiance/supercherie alors qu'ils étaient scannés simultanément à deux endroits différents. Les données étaient collectées par le biais d'un serveur et synchronisées sur Internet. Sur l'écran de l'émetteur était affiché un carré de couleur, rouge ou vert, et une fois identifiée, il devait décider s'il envoyait la couleur qu'il venait de voir ou une autre au receveur. Ce dernier avait pour objectif de déterminer si l'émetteur disait la vérité ou pas. Dans le cas où le receveur devinait correctement il obtenait une récompense sous la forme d'une gorgée de jus de fruit ; s'il échouait c'était l'émetteur qui en bénéficiait. Les analyses de cohérence cross-spectrales basées sur les estimations de densité spectrale se concentrèrent autour de 0.04Hz, la fréquence d'échange du jeu étant de 25s. Des clusters d'activités ont été dégagés dans l'aire motrice supplémentaire (AMS) dans le cerveau des deux participants, avec cependant une plus grande force du côté de l'émetteur. Cette étude préliminaire au champ de l'hyperscanning a permis d'ouvrir au champ des neurosciences cette technique d'étude et, bien que des problèmes d'optimisation résident dans ce paradigme (IRMf et récolte des données par Internet provoquant une grande latence), elle a eu le mérite de montrer qu'il était possible de scanner simultanément deux personnes lors d'une tâche d'interaction.

King-Casas et al. (2005) utilisèrent un paradigme de transaction économique à plusieurs rounds pour illustrer leur investigation sur l'interaction sociale en utilisant aussi une IRMf. Un investisseur devait décider du montant à donner à son partenaire. Le partenaire devait ensuite choisir la manière de partager le bénéfice final (équitablement ou non) qui s'élevait à environ trois fois la somme de départ. Au round suivant les rôles s'inversaient. En utilisant une mesure de corrélation des signaux BOLD (blood-oxygen-level dependent) intra- et inter-cerveau, King-Casas et collègues découvrirent que lorsque la relation était de confiance, la magnitude de la réponse dans le noyau caudé était en corrélation avec l'intention de faire confiance dans les rounds suivants. De plus, alors que la réputation se construisait et se renforçait entre les deux participants au cours du temps, le signal d'intention de faire confiance avait tendance à arriver 14 secondes plus tôt dans les essais suivants, précédant l'acte même d'investissement (**Figure 1.5**).

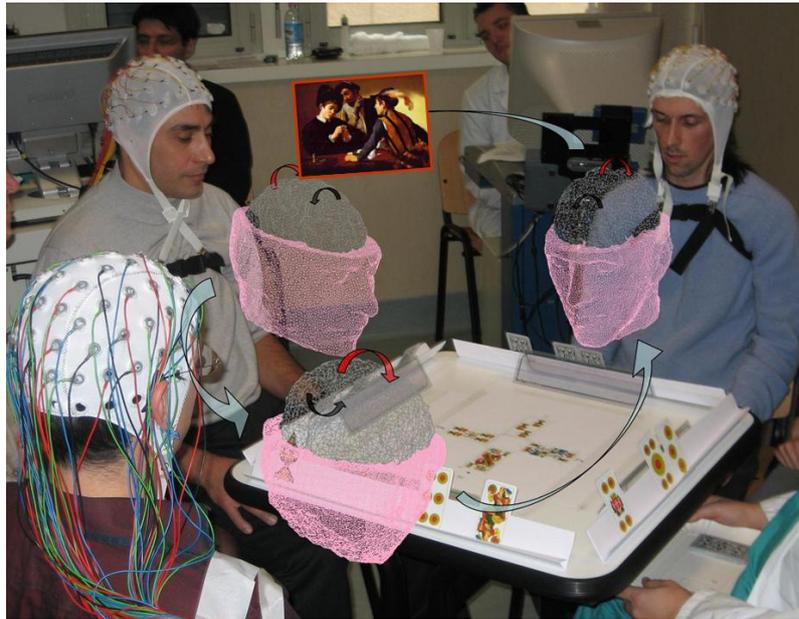


**Figure 1.5** Corrélogrammes du signal "d'intention de confiance" du noyau caudé par rapport à l'activité du cortex cingulaire moyen (MCC) de l'investisseur et du cortex cingulaire antérieur (ACC) du partenaire (King-Casas et al., 2005). (A) Régions de corrélation. Le signal "d'intention de confiance" dans le noyau caudé du partenaire a été corrélé en intra- et inter-cerveau avec : le cortex cingulaire moyen (MCC) de l'investisseur lors de la prise de décision ; et son propre cortex cingulaire antérieur (ACC) lors de la réception de la décision. (B) Corrélogrammes du noyau caudé, de l'ACC, et du MCC. Un signal "d'intention de confiance" issu du noyau caudé des partenaires a pu être mis en évidence à travers des rounds d'échange économique. La moyenne de ces signaux a été corrélée avec l'activité moyenne de l'ACC du partenaire et de l'activité moyenne du MCC des investisseurs au cours de la phase d'investissement de chaque tour, et est tracée avec différents décalages temporels. Les corrélogrammes sont présentés ici pour les premiers (3 et 4) et derniers rounds (séries 7 et 8). Les tracés bleus indiquent que la cross-corrélation la plus forte entre les deux participants (MCC et ACC) n'a pas changé au cours du temps. Cependant, on remarque dans les tracés verts que le pic de la cross-corrélation entre l'activité du MCC de l'investisseur et le signal "d'intention de confiance" dans le noyau caudé glisse de 14 secondes plus tôt dans le temps dans les derniers rounds par rapport aux premiers. Un résultat connexe évident est l'observation du phénomène du glissement de 14 secondes de la corrélation entre l'activité de l'ACC et le même signal dans le noyau caudé du partenaire (tracés rouges).

Ce transfert temporel du signal de confiance démontre qu'il est devenu anticipatoire plutôt que réactif. Ainsi, les auteurs émirent l'hypothèse que l'activité du noyau caudé chez les deux participants pouvait refléter le développement d'une réputation pour leur partenaire au travers de la construction d'un modèle de leur collègue dans leur propre cerveau (King-Casas et al., 2005). Cette étude suggère donc que les participants étaient capables de former une représentation mentale de leur partenaire, corrélé à des changements d'activité cérébrale, et d'agir en fonction de celle-ci dans les essais suivants, ce qui est important lorsque l'on considère les relations humaines d'un point de vue temporel. Nous reparlerons de ce point plus tard dans le manuscrit.

Dans ces deux études, le simple fait d'utiliser l'IRMf limite la dynamique des échanges entre les participants et ainsi ne profite pas au maximum de l'hyperscanning, étant donné que chaque personne doit attendre son tour avant de pouvoir répondre ou prendre une décision. De plus, la résolution temporelle de cette modalité est assez faible. Par ailleurs, de par la taille de l'outil d'imagerie, ils sont contraints dans leurs mouvements ; l'interaction ne peut se faire face à face et le plus souvent l'échange de données doit se faire par internet et par vidéo interposée, ce qui limite la validité écologique. Les expériences suivantes que nous allons décrire emploieront d'autres modalités de neuroimagerie (EEG, nIRS) restreignant moins la liberté de mouvement et permettant l'interaction face à face ainsi que la perception plus fine du regard de leur partenaire.

L'étude menée par Babiloni et al. (2006) met en jeu quatre joueurs de cartes en équipe de deux (nord-sud contre est-ouest) en employant l'EEG comme modalité de neuroimagerie (**Figure 1.6**). Le but du jeu, appelé "tressette" en Italie, est de mettre une carte plus forte de la même couleur, l'équipe qui possède la carte la plus forte l'emporte. Ainsi, la position du premier joueur de chaque équipe est très stratégique car ils doivent jouer en faisant des a priori sur le jeu de leurs partenaires. Les auteurs firent l'hypothèse qu'il devait exister une relation directionnelle dans ce type de relation. Pour mesurer la connectivité fonctionnelle entre deux joueurs d'une même équipe, ils adaptèrent la méthode de la Causalité de Granger (GC : Granger Causality) dans le domaine fréquentiel, pour les zones d'intérêt chez les cerveaux des deux joueurs. Ils découvrirent une cohérence dirigée de l'activité du Cortex Cingulaire Antérieur (ACC) du premier joueur vers l'activité des zones pariétales et préfrontales droites de son partenaire, notamment dans la bande de fréquence beta (12-28 Hz). Ce même groupe refit une étude similaire pour approfondir leurs recherches et d'affiner leurs résultats. Ils purent mettre en évidence avec le même paradigme que seuls les membres d'une même équipe possédaient une connectivité fonctionnelles au niveau de l'ACC et des zones pariétales et préfrontales (Astofli et al., 2010).



**Figure 1.6** Expérience effectuée en hyperscanning en utilisant plusieurs dispositifs EEG à haute résolution lors d'un jeu de cartes. Tiré de Babiloni et al. (2006).

Des modèles réalistes des têtes des joueurs, y compris le cuir chevelu, et les enveloppes corticales sont présentés devant chacun d'entre eux. Les flèches à la surface de chaque cortex représentent les connexions statistiquement significatives entre les zones corticales au cours d'une phase de jeu. Les flèches partent d'une région corticale et pointent vers une autre région corticale. Les liens de causalité signifient que l'activité dans la région corticale cible peut être mieux modélisée si l'on inclut l'activité de la région source.

La même équipe mena plusieurs autres études en utilisant la méthode de l'hyperscanning en EEG. Dans l'étude suivante, ils utilisèrent le paradigme du dilemme du prisonnier (Babiloni et al., 2007). Les joueurs avaient deux choix : soit de coopérer pour gagner tous deux un faible gain, soit de trahir l'autre pour gagner beaucoup plus tout en faisant perdre beaucoup à leur partenaire. S'ils décidaient de se trahir mutuellement, les deux joueurs perdaient un peu d'argent. Pour analyser les données, les auteurs utilisèrent une version modifiée de la GC, la Cohérence Dirigée Partielle (PDC) (Baccalá & Sameshima, 2001), en plus de la théorie des graphes. Babiloni et collègues découvrirent que le cortex préfrontal médial était systématiquement activé dans toutes les conditions d'interaction sociale. Ils trouvèrent aussi que l'ACC jouait un rôle discriminant dans la situation où les deux participants se trahissaient, ce qui est en accord avec les récentes hypothèses concernant l'attention dirigée vers ses propres états mentaux et ceux d'autrui de la théorie de l'esprit (ToM) (Gallagher & Frith, 2003). La même équipe répliqua l'expérience dans une version à plusieurs itérations de 200 essais (Fallani et al., 2010). Les joueurs devaient choisir soit de coopérer pour un grand gain pour la communauté, soit de trahir l'autre pour un gain personnel plus grand, sachant que s'ils se trahissent tous les deux, ils ne gagnaient rien. L'objectif des auteurs était de prévoir quels duos choisiraient de ne pas coopérer en observant les patterns de connectivité inter-cerveau en utilisant la PDC et la théorie des graphes (Bullmore & Sporns, 2009). Ils découvrirent que la seule

paire décidant de se trahir l'un l'autre avait une connectivité significativement plus faible que toutes les autres, en plus d'une plus grande modularité dans leur réseau de graphe. Les auteurs firent la suggestion qu'une tâche encourageant la coopération entre les effecteurs rendrait compte d'une meilleure connectivité inter-cerveau, bien plus qu'une interaction émotionnellement "neutre" et avec peu d'enjeu.

Dans un setup d'hyperscanning en EEG, Kawasaki et al. (2013) étudièrent des duos prononçant des lettres de l'alphabet de A à G chacun leur tour. L'expérience possédait trois phases d'interaction : humain-humain, humain-machine puis humain-humain à nouveau. Leurs analyses comportementales montrèrent que les humains arrivaient à synchroniser leur diction plus longtemps entre eux qu'avec une machine. De plus, empruntant une analyse en transformé d'ondelettes (Daubechies, 1990), ils découvrirent des synchronisations au niveau des régions temporales et latérales-pariétales dans les bandes de fréquences theta/alpha (6-12 Hz) chez les humains lorsqu'ils parlaient ensemble, dont le couplage cérébral se renforçait dans la deuxième condition humain-humain. Il est intéressant de noter aussi que ces synchronisations furent aussi retrouvées dans une condition "observation" où un des participants regardait son partenaire interagir avec la machine. De plus, la synchronisation dans les régions temporales s'améliorait lors de la condition "observation" lorsque les expérimentateurs utilisèrent des voix familières enregistrées (i.e., la voix du partenaire) lorsque c'était au tour de la machine de parler, plutôt que d'utiliser une voix robotique. Les auteurs suggérèrent que ces couplages cérébraux pourraient refléter un état d'empathie de l'observateur envers son collègue humain réalisant la tâche. Ainsi, ils firent l'hypothèse qu'un stimulus teinté émotionnellement pourrait faciliter et renforcer la synchronie cérébrale.

Certaines équipes utilisèrent un autre instrument d'imagerie cérébrale appelée spectroscopie proche infrarouge ou NIRS (Near Infrared Spectroscopy) dont le principe est de monitorer de façon continue la saturation cérébrale en oxygène dans l'hémoglobine ainsi que sa contrepartie désoxygénée, la désoxyhémoglobine. Funane (2011) fut le premier à utiliser la NIRS en situation d'hyperscanning dans une tâche où les participants devaient appuyer simultanément sur un bouton en face de chacun d'entre eux après avoir compté jusqu'à 10 dans leur tête, et ce, de manière à être le plus synchronisé possible. Ils mirent en évidence une augmentation de la covariance dans l'oxyhémoglobine des deux sujets dans les moments où ils interagissaient de façon très fine et simultanée. Ils purent dégager aussi une corrélation positive entre le degré de covariance de l'oxyhémoglobine inter-sujet et la performance de la tâche (Funane et al., 2011).

Dans une autre étude similaire, Cui et collègues (2012) proposèrent une étude lors d'un jeu sur ordinateur avec deux conditions différentes. Les joueurs installés côte à côte devaient appuyer sur un bouton plus rapidement que leur collègue en condition de compétition. En condition de coopération, la moyenne des temps de réactions des deux joueurs devaient être inférieure à une limite prédéfinie. Les joueurs répétèrent les tâches deux fois chacune. Les auteurs utilisèrent une analyse par cohérence d'ondelettes (WTC : Wavelet Transform Coherence) pour mesurer le couplage cérébral. Il s'agit d'une mesure de cross-corrélation de deux séries temporelles en fonction de la fréquence et du temps. Cui et collègues mirent en évidence qu'une augmentation de la cohérence inter-cerveau était corrélée à une amélioration de la performance en condition de coopération, mais pas en condition de compétition. De plus, ils découvrirent que la cohérence entre les cortex supérieurs frontaux des participants lors de la coopération augmentait par rapport à la condition de compétition. Les auteurs suggérèrent qu'une condition d'interaction en coopération élicite des signaux promouvant la connectivité entre cerveaux par rapport à une condition de concurrence (Cui et al., 2012).

Toutes ces études montrent l'intérêt de l'enregistrement en hyperscanning lors de processus plus ou moins complexe engageant plusieurs personnes (deux ou plus), et témoignent de la spécificité des phénomènes d'interaction (i.e., lien entre les partenaires d'une même équipe) qui ne sauraient être seulement dues à des feedback sensorimoteurs similaires ou des actions proches. De plus, tous les outils innovants développés dans ces expériences pour l'analyse conjointe rendent possible la caractérisation de l'activité cérébrale à un niveau individuel et conjoint, et ce de façon variée et complémentaire. Cependant, bien que ces outils d'imagerie n'entravent pas les mouvements, soient peu contraignants à mettre en place et permettent l'action en face à face, tous ces protocoles placent les participants dans des situations où ils agissent tour-à-tour ou selon un rythme imposé, et ainsi ne témoignent pas de l'aspect dynamique (à l'échelle de la centaine de milliseconde) d'une interaction en situation écologique. Aussi, d'autres expériences essayèrent de mettre en évidence les processus mis en jeu lors de telles interactions continues.

### **c. Etudes en interaction continue**

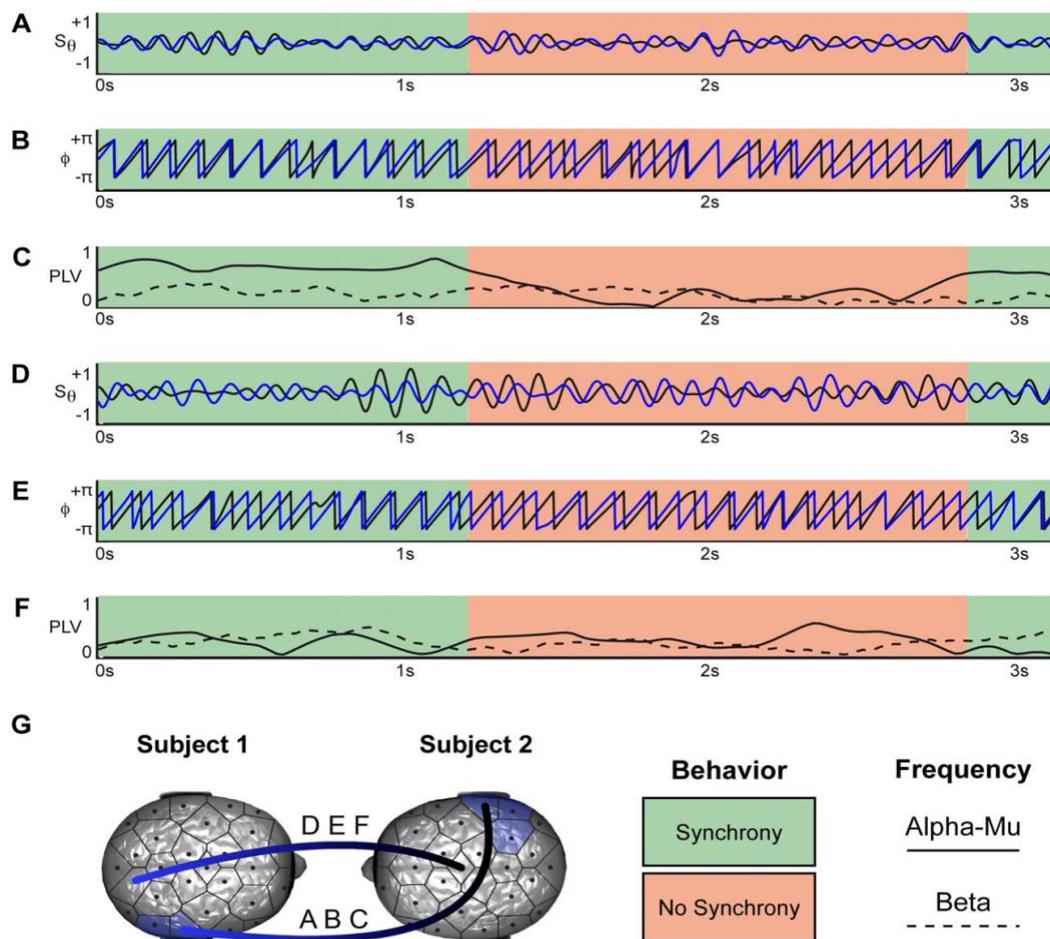
Les premiers à étudier une interaction continue furent Tognoli et al. (2007). A l'aide d'EEG ils scannèrent des paires de participants ayant pour tâche de taper un doigt sur une table rythmiquement ou non (selon la condition), avec ou sans feedback visuel. Leur analyse à haute résolution spectrale de l'activité EEG révéla une composante oscillatoire qu'ils appelèrent "phi complexe", composée de phi 1 et phi 2, au niveau du cortex centro-pariétal droit dans la bande de fréquence alpha (8-12 Hz). Cette composante est à la fois sensible aux mouvements indépendants et

en synchronisation, avec  $\phi_1$  représentant le comportement indépendant de chaque participant et  $\phi_2$  représentant leur coordination (Tognoli et al., 2007). Naeem et al. (2012) répliquèrent l'expérience précédente en rajoutant la tâche de taper le doigt en anti-phase par rapport à son collègue. Ils eurent des résultats similaires à Tognoli et al. (2007), avec en plus une variable de modulation de la bande de fréquence mu (10-12Hz) différenciant l'intention de taper en phase ou en anti-phase (Naeem et al., 2012). Ces deux études fournirent des résultats préliminaires quant à l'existence de mécanismes permettant la coordination motrice entre deux effecteurs lors d'interaction continue. Cependant, elles n'examinèrent pas la connectivité inter-cerveau des participants et n'exploitèrent pas l'ensemble du potentiel d'un setup en hyperscanning.

L'étude de Yun et al. (2012) exploita l'idée de la synchronisation implicite lors de l'interaction physique avec un autre être humain. L'expérience possédait trois phases. Tout d'abord, les deux participants devaient s'asseoir face à face et tendre un bras en direction l'un de l'autre en miroir (bras droit vs bras gauche). Leur tâche était de maintenir le bout de l'index le plus immobile possible en regardant l'index de leur partenaire. Puis dans une seconde phase, un leader choisi au hasard devait réaliser des mouvements aléatoires avec sa main et son partenaire devait s'efforcer à reproduire ces mouvements le plus précisément possible. Enfin, en guise de troisième phase il était demandé aux participants de recommencer la première phase de l'expérience et de garder l'index le plus immobile possible en regardant celui de l'autre. Les analyses comportementales montrèrent qu'implicitement les mains des participants se synchronisaient l'une avec l'autre, et d'autant plus lors de la dernière phase "d'immobilité" qu'à la première. D'un point de vue cérébral, les auteurs utilisèrent une mesure de connectivité appelée Phase Locking Value (PLV) (Lachaux et al., 1999). Ils découvrirent une augmentation de la synchronisation de phase inter-cerveau dans les bandes de fréquence theta (4-7 Hz) et beta (12-30 Hz) entre les deux participants au niveau du gyrus frontal inférieur, du cortex cingulaire antérieur, du gyrus parahippocampal et du gyrus postcentral après la seconde phase. Les auteurs suggérèrent que ces connectivités pouvaient rendre compte de l'activité d'introspection de chaque personne et de la représentation interne de l'autre, en plus de la détection des indices visuels dépendants du contexte social (Yun et al., 2012). Cette étude démontre qu'une simple activité d'interaction sociale, telle que suivre le mouvement d'une autre personne explicitement, peut changer notre comportement et notre activité cérébrale implicitement, même à l'encontre de notre volonté.

Dans la même lignée, Dumas et al. (2010) menèrent une étude en EEG qui consistait à imiter mutuellement les mouvements de mains de son partenaire. Utilisant un setup expérimental muni d'un double retour vidéo pour que chaque sujet voie les mains de l'autre, les participants devaient soit s'imiter ou pas lorsqu'ils en éprouvaient l'envie, soit un leader désigné faisait des mouvements

arbitraires et l'autre devait le suivre en l'imitant le mieux possible. Utilisant une mesure de PLV, ils mirent en évidence une augmentation de la synchronisation inter-cerveau sur les bandes de fréquences mu (9-11 Hz), beta (13-30 Hz) et gamma (31-48 Hz) dans les aires centro-pariétales droites des deux participants lors des épisodes de synchronies comportementales par rapport aux moments non synchronisés (**Figure 1.7**). Plus important encore, aucune différence ne fut trouvée entre les conditions d'imitation et de non-imitation, mettant ainsi à l'écart l'explication d'une synchronie inter-cerveau due exclusivement à une similarité dans l'exécution et la perception des gestes. Enfin, les patterns de synchronisation dans les hautes bandes de fréquences (beta et gamma) chez les deux sujets étaient asymétriques entre les régions cérébrales du modèle et de l'imitateur.



**Figure 1.7** Echantillons d'épisodes d'imitations spontanées dans la dyade n° 3 montrant la correspondance entre les synchronies issues de l'interaction et l'activité cérébrale.

Les zones vertes indiquent les périodes où les sujets sont physiquement synchronisés et les périodes de rouge les moments où ils ne l'étaient pas. **A.** Décours temporel du signal EEG normalisé et filtré dans la bande de fréquences alpha-mu pour les canaux P8 des deux sujets. **B.** Phase extraite à partir des signaux. **C.** PLV calculée avec fenêtres glissantes de 800ms dans la bande alpha-mu (lié à A et B), quantifiant la synchronisation neurale entre les deux sujets. La PLV pour la bande de fréquence beta sur les mêmes électrodes est également représentée en pointillés. **D.** Décours temporel du signal EEG normalisé et filtré dans la bande de fréquence alpha-mu pour les canaux PO2 chez le sujet 1 et Cz chez le sujet 2. **E.** Phase extraite à partir des signaux. **F.** PLV calculée avec fenêtres glissantes de 800ms dans la bande alpha-mu (liée à D et E), quantifiant la synchronisation neurale entre les deux sujets. La PLV pour les mêmes électrodes dans la bande de fréquence beta est également représentée en pointillés. **G.** Représentation des paires d'électrodes P8-P8 (A, B, C) et PO2-Cz (D, E, F).

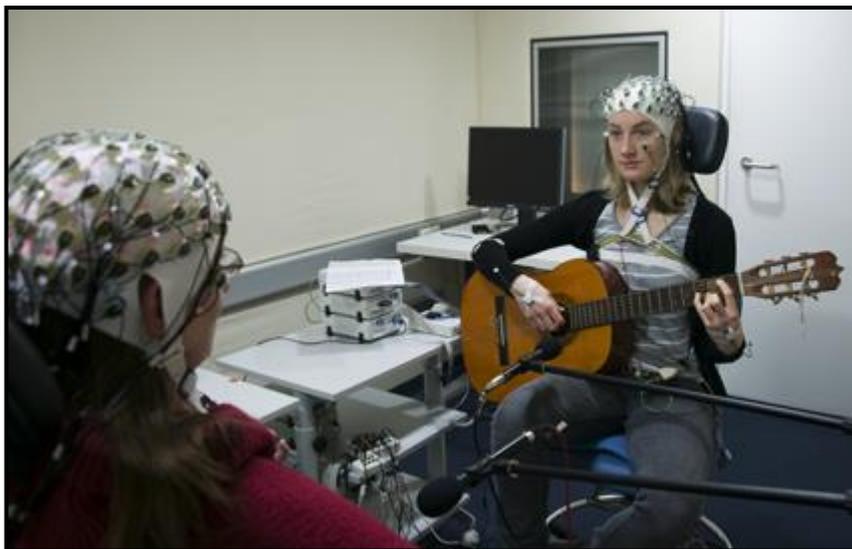
Les auteurs émirent l'hypothèse que cette asymétrie pouvait témoigner des rôles que les participants s'attribuaient (spontanés ou imposés) de leader/suivant (Dumas et al., 2010).

Dans une autre étude proposée par Astofli et al. (2011) un pilote de ligne et son co-pilote étaient scannés simultanément grâce à un EEG en situation de décollage, vol et atterrissage. La totalité de l'expérience se passa à l'intérieur d'un simulateur pour des raisons de sécurité. Les auteurs utilisèrent la PDC comme mesure de synchronisation inter-cérébrale. Ils mirent en évidence une augmentation de la Densité de Puissance Spectrale (PSD) de la bande de fréquence theta (3-7 Hz) dans les électrodes frontales (F3, Fz et F4), ainsi qu'une inhibition de la PSD dans la bande de fréquence alpha (8-12 Hz) sur les électrodes pariétales (P3, Pz et P4) lorsque la tâche demandait une forte coopération entre le capitaine et son premier officier (i.e., décollage et atterrissage). Les connections inter-cérébrales les plus fortes révélées par la mesure de PDC impliquaient les électrodes frontales, dirigées du copilote vers le capitaine. En effet, la tâche du copilote était de lire, contrôler et relayer les informations des instruments de mesure au capitaine, et la tâche de ce dernier, de piloter l'appareil en fonction. Lors des phases ne requérant pas d'interactions poussées entre les deux pilotes (phase de vol), peu ou pas de connectivité inter-cérébrale fut enregistrée. Ce résultat suggère que lors d'une situation proche de la réalité, une série d'activités avec coopération dans un but fin et précis engage une connectivité fonctionnelle entre les cerveaux des effecteurs, ici des pilotes.

Dodel et al. (2011) proposèrent une nouvelle approche pour étudier la dynamique de coordination interpersonnelle basée sur la décomposition en valeur singulière (SVD : Singular Value Decomposition). Lors d'une tâche impliquant une simulation de jeu de combat, les auteurs démontrèrent que les participants en équipe possédaient une activité EEG évoluant selon un sous-espace commun d'une certaine dimensionnalité avec une signature spécifique de leur coordination. De plus, ils trouvèrent que l'expertise d'une équipe avait un impact sur la dimensionnalité intrinsèque de leur sous-espace. Une équipe experte possédait moins de dimensions qu'une novice, ce qui semble être en accord avec de récentes études sur la synergie interpersonnelle (Riley et al., 2011).

Lindenberger et al. (2009) firent une expérience sur des duos de guitaristes équipés d'EEG jouant une mélodie. Les auteurs utilisèrent deux indices de synchronisation de phase qu'ils appelèrent le Phase Locking Index (PLI) et Inter-cerebral Phase Coherence (IPC), le premier reflétant les invariances de phase entre les essais sur une électrode dans un seul cerveau, et l'autre représentant le degré de constance des différences de phase d'un essai à l'autre entre deux électrodes provenant de deux cerveaux différents. Ils trouvèrent une augmentation de la synchronisation de phase en intra- (PLI) et inter-cerveau (IPC) sur la bande de fréquence delta/theta

(3.3-4.8 Hz) lorsque les musiciens jouaient ensemble, comparé à la condition où ils ne faisaient qu'écouter un métronome. Le problème principal soulevé lors de cette manipulation expérimentale était que les paires de guitaristes jouaient la même mélodie (similarité sensori-motrice) en même temps, et, qu'en plus de cela, ils étaient synchronisés sur un même tempo tiers (métronome). Ces facteurs pourraient à eux seuls expliquer que les aires sensori-motrices soient synchronisées (Chatel-Goldman et al., 2014). Ainsi, il résidait un doute quant à l'origine de la synchronisation inter-cerveau. De manière à contrôler ces facteurs de confusion, le même groupe de chercheurs monta une autre expérience similaire en modifiant la partition pour que les guitaristes ne jouent pas exactement la même chose tout en gardant la nécessité d'une coordination fine (Sänger et al., 2012). Examinant les bandes de fréquences trouvées précédemment avec la PLI et l'IPC ainsi que la théorie des graphes, ils découvrirent une augmentation de la synchronisation de phase dans les réseaux intra- et inter-cérébraux au niveau des électrodes frontales et centrales lors des périodes demandant une haute coordination musicale (**Figure 1.8**).



**Figure 1.8 Les avantages de l'EEG en tant que modalité de neuroimagerie. De Sänger et al., (2012).**

L'expérience de Sänger et collègues (2012) est un exemple approprié pour l'étude de l'interaction sociale d'une manière écologique avec une tâche socialement engageante. Dans cette expérience, les guitaristes ont la possibilité de voir le visage de leur partenaire sans intermédiaire, rendant possible la lecture des émotions ainsi que d'observer la direction du regard, des éléments cruciaux de l'interaction humaine (empathie, théorie de l'esprit). De plus, l'EEG en tant que modalité de neuroimagerie entrave modérément la liberté de mouvement des musiciens comparé à d'autres modalités telles que l'IRMf ou la MEG, leur permettant ainsi d'interagir d'une manière plus écologique. Enfin, la tâche choisie (la performance musicale) est pertinente pour plusieurs raisons que nous expliquerons plus bas, mais essentiellement parce qu'elle possède une réalité sociale : s'entraîner à faire de la musique avec quelqu'un est une activité commune.

Dans une étude plus récente par les mêmes auteurs, Sänger et al. (2013) explorèrent l'effet du rôle des musiciens sur leur couplage cérébral en utilisant une mesure de synchronisation de phase décalée dans le temps, l'Index de Couplage Intégratif (ICI), ainsi que la théorie des graphes. L'un des musiciens était désigné leader et devait gérer le tempo ainsi que décider du moment précis du début du jeu musical. Après avoir déterminé l'architecture des graphes dans les cerveaux des deux

participants, les auteurs montrèrent que la synchronisation des électrodes du meneur vers celles du suiveur était plus forte dans la bande de fréquence alpha (12 Hz) lors de périodes de 500 ms de coordination musicale. Sänger et collègues mirent l’emphase sur le rôle important que le meneur possède sur le paramètre temporel de l’action conjointe des deux musiciens, rejoignant les travaux de Dumas et al. (2010) sur la synchronisation des mouvements des mains.

Une étude récente utilisant une tâche de synchronisation de tapping avec le doigt confirma cette tendance asymétrique dans les interactions de leader-follower (Konvalinka et al., 2014). Les auteurs trouvèrent que l’inhibition de rythmes alpha dans les électrodes frontales était fonction des rôles, étant plus importante dans le cas des leaders plutôt que des followers. Ils interprètent cette inhibition comme étant due au fait que les leaders doivent allouer plus de ressources cognitives au maintien de leur propre rythme plutôt que de contrôler celui de leur partenaire.

Une autre étude menée par Müller et al. (2013) étudia l’improvisation musicale. En effet, l’un des reproches concernant leurs études précedentes sur les guitaristes était que le design expérimental en essais multiples restreignait les possibilités d’observation d’un comportement écologique, les prévenant de mesurer un comportement se rapprochant plus de la vraie vie. Les auteurs essayèrent de pallier à cette limitation en concevant une expérience où des guitaristes devaient faire de l’improvisation de type jazz pendant quelques minutes. De plus, dans cette expérience, ils ne leur fournirent aucun métronome afin de forcer les musiciens à trouver leurs propres rythmes communs. L’analyse des données fut réalisée grâce à l’ICI et la théorie des graphes. Les résultats mirent en évidence deux “hyper-réseaux” cerebraux entre chaque duo de guitaristes : l’un, intra-cerebral, s’étendant sur tout la surface du cortex et reposant sur les hautes bandes de fréquence (i.e., beta : 14-28 Hz), et l’autre, inter-cerebral, reposant sur les basses bandes de fréquence (delta : 2-3 Hz ; et theta : 5-7 Hz), variant au cours du temps et selon les musiciens. De plus, ils découvrirent que certaines propriétés des réseaux cerebraux pouvaient être reliées au rôle musical, à la mélodie et à l’accompagnement en accords pendant l’improvisation. Les auteurs émirent l’hypothèse que l’augmentation de hubs de connections dans les réseaux inter-cerebraux à basse fréquence pourraient souligner des mécanismes de coordination sociale permettant à des individus d’interagir pendant des actions conjointes fines (i.e., l’improvisation en jazz) (Müller et al., 2013).

Babiloni et al. (2012) étudièrent le couplage cerebral en EEG de quatuors de saxophonistes lorsqu’ils devaient jouer “en ensemble”. Les saxophonistes devaient interagir selon quatre conditions expérimentales : jouer leur morceau ensemble, se reposer, regarder une vidéo de leur performance collective, regarder une vidéo contrôle. En plus des quatre enregistrements simultanés en EEG, les auteurs administrèrent un questionnaire mesurant un score d’empathie. Les analyses

furent réalisées grâce à la tomographie électromagnétique du cerveau standardisée à basse résolution (sLORETA) (Congedo, 2006; Pascual-Marqui, 2002), et à un index d'activation/désactivation déterminé selon une augmentation/diminution de la puissance des rythmes EEG alpha (8-12 Hz) selon la tâche réalisée (TRPD/TRPI). Les résultats montrèrent que, plus le quotient d'empathie était élevé chez un musicien, plus on observait une désynchronisation de la bande alpha au niveau de l'aire de Brodmann 44/45 droite. Les auteurs suggérèrent que lorsqu'un musicien observait sa propre performance musicale, la désynchronisation alpha ventro-frontale gauche soulignait les processus attentionnels globaux et d'empathie émotionnelle (Babiloni et al., 2012). Notons que cette étude est la première qui introduit la notion d'émotion et d'empathie lors d'activités requérant une coopération fine et une coordination comportementale inscrite dans le temps comme la musique.

Dans une étude récente menée par Chatel-Goldman et al. (2014), les chercheurs se focalisèrent sur l'aspect émotionnel de l'interaction sociale en demandant à des partenaires romantiques de faire passer une émotion à travers le touché affectif. Dans cette étude, la conductance cutanée, les battements cardiaques, la respiration ainsi que deux EEG étaient simultanément enregistrés. Les partenaires devaient se prendre la main et, sans se voir, essayer de transmettre une émotion positive ou négative reliée à un événement vécu. Les auteurs découvrirent que le toucher romantique augmentait le couplage de l'activité électrodermale cutanée entre les couples, quelle que soit la nature de l'émotion, et que le touché physique entraînait des changements mesurables dans l'état physiologique des couples. Bien que l'étude n'ait pas produit de résultats significatifs au niveau de l'EEG, elle mit en évidence des résultats intéressants d'un point de vue physiologique, suggérant que le simple touché physique peut permettre l'émergence d'une résonance somato-viscérale entre les couples.

Une autre étude sur le touché fut dirigée par le groupe de Müller et Lindenberger (2014). Ils examinèrent le baiser romantique chez les humains. À l'aide de la théorie des graphes et le couplage inter-fréquence (CFC) (Canolty et al., 2006), les auteurs cherchèrent à trouver si les cerveaux des couples étaient plus synchronisés lorsqu'ils s'embrassaient plutôt que lorsqu'ils embrassaient leur propre main ou qu'ils exécutaient une tâche mentale d'arithmétique. Les résultats montrèrent quelques similitudes avec leurs précédentes expériences sur les guitaristes. En effet, ils trouvèrent un sous-réseau inter-cérébral entre les deux partenaires sur les bandes de fréquence theta (4-7 Hz) et alpha (8-12 Hz). Ils trouvèrent aussi une corrélation significative entre la satisfaction du baiser et la puissance de synchronisation de phase inter-cérébrale theta (5 Hz). Cette corrélation était plus grande pour la condition où les couples s'embrassaient comparée à la condition où ils devaient embrasser leur main. Les auteurs émirent l'hypothèse que la synchronisation de phase theta pourrait

supporter les actions de synchronisations volontaires interpersonnelles, ainsi que la création de liens affectifs.

Toutes les études précédentes employèrent l'EEG comme modalité de neuroimagerie qui nous semble être la plus adaptée, à notre sens, à l'exploration de l'interaction sociale continue d'un point de vue écologique et à son analyse temporelle, de par sa résolution à l'échelle de la milliseconde. Les trois études suivantes en interaction continue ont été réalisées grâce à la NIRS.

L'expérience menée par Holper et al. (2012) examina le couplage cérébral lors de l'imitation. Les participants devaient réaliser une tâche de tapping de façon synchrone avec un doigt, soit selon un rythme prédéfini avec un métronome, soit l'un jouait le rôle de modèle et son partenaire devait imiter son rythme. Les auteurs utilisèrent la WTC et la GC pour analyser les données récoltées. Ils montrèrent une augmentation de la cohérence inter-cérébrale dans le cortex frontal gauche des deux participants lors de la tâche d'imitation par rapport à la condition contrôle. Les auteurs en déduisirent que l'augmentation de la cohérence était due à l'effort d'imitation et non pas à cause de la similarité des mouvements moteurs (Holper et al., 2012).

Dans l'expérience suivante, Jiang et al. (2012) utilisèrent un paradigme mettant en jeu la conversation comme interaction sociale. Les participants devaient parler de deux sujets de discussion contemporains dans plusieurs conditions de communication : dialogue face à face, dialogue dos à dos, monologue face à face, monologue dos à dos. Les auteurs utilisèrent une mesure de WTC, et mirent en évidence une synchronisation inter-cérébrale uniquement dans la condition de dialogue face à face au niveau du cortex frontal inférieur (IFC) gauche. De plus, la magnitude de couplage des IFC permettait de prédire précisément les occurrences de communication non verbale de langage corporel et de prise de parole. Jiang et collègues suggèrent que la synchronisation des IFC pourrait être médiée par des comportements non-verbaux lors d'interaction sociale comme la communication verbale (Jiang et al., 2012).

Dommer et al. (2012) conçurent un protocole en hyperscanning avec la NIRS ayant pour activité une tâche de dual n-back (rappel d'un item qui est apparu il y a 'n' étapes). Il y existait deux conditions : soit les participants étaient groupés par paire et assis côte-à-côte pour réaliser la tâche de n-back de manière conjointe (condition paire), ou alors ils devaient exécuter la tâche seul (condition solo). Les auteurs utilisèrent la WTC comme mesure de synchronisation. L'étude révéla que la cohérence inter-cerveau augmentait de façon significative dans le cortex préfrontal lors de la condition paire par rapport à la condition solo, suggérant que la coordination du comportement inter-individuel tend à coupler les deux cerveaux ensemble. En outre, les auteurs ont mis en évidence deux bandes de fréquences contribuant à la synchronisation inter-cérébrale: la fréquence de

battement cardiaque de chaque participant et une bande de basse fréquence (environ 0,1 Hz). Basé sur ces résultats, les auteurs concluent que le réseau inter-cérébral de basse fréquence pourrait supporter les comportements coordonnés effectués de manière conjointe (Dommer et al., 2012). Le **Tableau 1.1** présente un échantillon représentatif des études que nous venons de voir dans cette section et classe les études en fonction de leur design que nous jugeons comme étant plus ou moins écologique.

	<b>Device</b>	<b>Experimental paradigm</b>	<b>Interaction</b>	<b>Method of analysis</b>	<b>Reference</b>
Less ecological	fMRI x2	Trust game	Turn-based	Coherence	(Montague, 2002)
	NIRS x2	Button pressing, cooperation / competition	Turn-based: trials	Wavelet Transform Coherence	(Cui et al., 2012)
	EEG x2	Prisoner's dilemma	Turn-based	Granger's Causality	(Babiloni et al., 2007)
	EEG x2	Chicken's game	Turn-based	Directed Transfer Function, Partial Directed Coherence	(Astolfi et al., 2010)
	EEG x2	Speech rhythm	Turn-based	Wavelet transform, Cross-correlation analysis	(Kawasaki et al., 2013)
	EEG x2	Finger tapping	Continuous	Power spectra analysis (no inter-brain analysis)	(Tognoli et al., 2007)
	EEG x2	Finger movement	Continuous	Phase synchrony and behavioral analysis	(Yun et al., 2012)
	EEG x2	Hands movement	Continuous	Phase Locking Value	(Dumas et al., 2010)
More ecological	fMRI (no hyperscanning)	Natural movie viewing	Observation	Correlation of hemodynamic waveform	(Hasson et al., 2004)
	EEG x4	Card Game	Turn-based	Partial Directed Coherence	(Babiloni et al., 2006)
	EEG x2	Plane operating	Continuous	Partial Directed Coherence	(Astolfi et al., 2011)
	EEG x4	Saxophone playing	Continuous	Frequency analysis (TRPD/TRPI) and correlation with empathy	(Babiloni et al., 2012)
	EEG x2	Guitar playing	Continuous	Graph Theory Analysis, Integrative Coupling Index	(Lindenberger et al., 2009)
	EEG x2	Romantic kissing	Continuous	Graph Theory Analysis, Cross-Frequency Coupling	(Müller & Lindenberger, 2014)

**Tableau 1.1 Résumé des études en hyperscanning selon la modalité, le type de stimuli, le type d'interaction, et les méthodes d'analyses utilisées.**

Ce tableau montre un échantillon représentatif d'études en hyperscanning selon la modalité, le type d'activité et d'interaction utilisé. Nous indiquons la méthode d'analyse employée et faisons une distinction entre les études que nous considérons plus ou moins écologiques.

### III. Conclusion

Le but des neurosciences sociales est de comprendre le fondement neuronal de l'interaction sociale, ce qui nécessite l'étude d'êtres humains en interaction libre (Di Paolo & De Jaegher, 2012; Hari & Kujala, 2009). Dans ce chapitre, nous avons examiné la littérature en hyperscanning (**Tableau 1.1**). Deux observations importantes peuvent être tirées de toutes ces études. Premièrement, il a été démontré qu'il existe une asymétrie inter-sujet dans la puissance des signaux EEG, la plupart du temps dans la bande alpha (8-12 Hz) au niveau des électrodes frontales, particulièrement dans le cas des interactions leader-follower. L'abaissement de la puissance des signaux en EEG dans la bande de fréquence alpha du leader pourrait refléter l'auto-allocation de ressources cognitives à son statut de leader, mais peut aussi être relié à l'empathie du follower (Babiloni et al., 2012; Konvalinka et al., 2014). Deuxièmement, il semble exister deux réseaux en jeu lors de l'interaction sociale: un intra-individuel oscillant à des fréquences plus élevées telles que les bandes alpha (8-14 Hz) et bêta (14-28 Hz), et un inter-individuel oscillant à plus faibles fréquences dans les bandes delta (1-4 Hz) et thêta (4-7 Hz). Ce dernier réseau peut être plus difficile à étudier car son émergence semble être plus transitoire et fragile. Afin d'augmenter l'occurrence d'événements synchronisés et de renforcer leur stabilité, nous proposons de susciter des émotions car elles sont un catalyseur de l'interaction sociale et semblent favoriser le couplage du cerveau entre participants (Kawasaki et al., 2013; Nummenmaa et al., 2012).

La dernière décennie a vu une véritable explosion d'études en neurosciences sociales. Ce nouveau champ de recherche appelle à un changement de paradigme. Basé sur les résultats récents, nous soutenons que la performance musicale est un paradigme expérimental adéquat pour étudier l'interaction humaine et la coopération.

## **Chapitre II. Méthodologie en Hyperscanning**



## Chapitre II

# Méthodologie en Hyperscanning

---

A la lumière des études présentées dans le chapitre précédent, nous offrons une réflexion sur l'hyperscanning dans les sections qui suivent. Ces considérations portent sur la manière la plus adaptée possible d'élaborer une étude en hyperscanning en prenant en compte l'objectif d'étudier l'interaction sociale. Pour cela, nous discutons de la validité écologique, de la nécessité d'une composante émotionnelle, de la valeur ajoutée dans le design longitudinal et enfin nous introduisons la performance musicale comme paradigme répondant à ces prérequis.

## I. Conception expérimentale

### a. La validité écologique

Contrairement à la méthode traditionnelle des neurosciences qui consiste à étudier les individus isolés dans un environnement contrôlé (Hari & Kujala, 2009), l'objectif des neurosciences sociales est de révéler les marqueurs physiologiques de l'interaction sociale en utilisant un paradigme permettant d'étudier les êtres humains dans un environnement plus écologique (Schilbach et al., 2012). La validité écologique a longuement été débattue en psychologie par le passé, son sens profond étant en permanence discuté par la communauté. De multiples définitions ont été données (Scheidt, 1981), mais leur dénominateur commun est la relation entre les phénomènes du monde réel et leur étude dans des contextes expérimentaux. Trois dimensions peuvent être extraites à partir de cette idée : *la nature de l'environnement*, *le type de stimuli*, et *les réponses des participants* à ces stimuli (Schmuckler, 2001).

La première dimension, *la nature de l'environnement*, a émergé lors d'une discussion entre Brunswik (1943) et Lewin (1943) à propos du contexte environnemental en laboratoire et de son impact sur les expériences. Brunswik craignait que les psychologues étudient de plus en plus "des problèmes de médiation technique très spécifiques, artificiellement générés, et non représentatifs de la vie dans son ensemble". Afin d'éviter cette approche réductionniste, il a conseillé d'élargir la portée de l'analyse expérimentale en incluant aussi les situations réelles dans lesquels les participants se trouvaient (Brunswik, 1943). Ses préoccupations et ses conseils vieux d'un demi-siècle

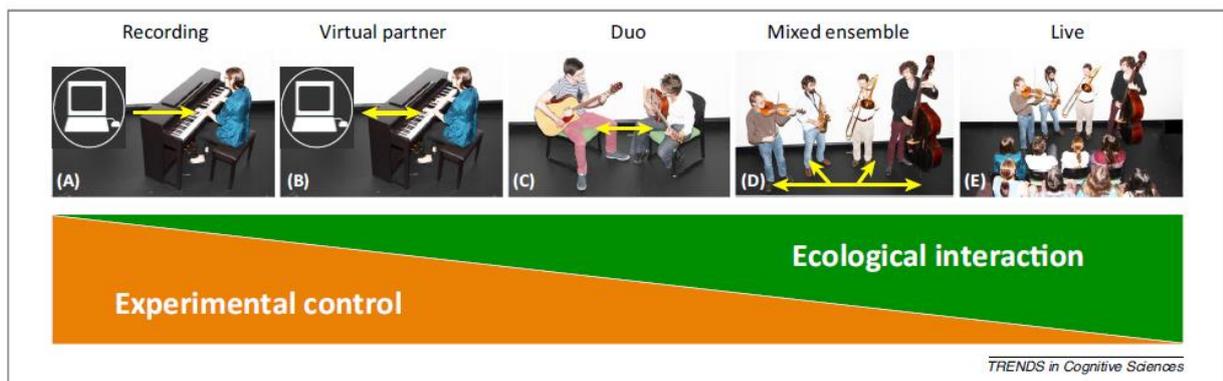
sont maintenant de plus en plus considérés dans l'étude des interactions sociales humaines du point de vue des neurosciences. Plus spécifiquement, *la nature de l'environnement* fait référence à la manière dont le contexte expérimental est perçu par les participants ("vraie vie") et s'il possède les propriétés expérimentales adéquates recherchées par l'expérimentateur (Bronfenbrenner, 1977). Cependant, bien que la *nature de l'environnement* soit cruciale lorsque l'on étudie un comportement particulier, elle est souvent sacrifiée pour des raisons techniques (modalité d'enregistrement, contrôle expérimental, etc.). Des études récentes montrent que les influences hormonales peuvent jouer un rôle important dans la modulation de comportement social (Volman et al., 2011). Ainsi, les situations écologiques, comme les interactions en face à face, pourraient favoriser ce canal d'influence (Henckens et al., 2009).

La deuxième dimension de la validité écologique, probablement la plus connue, est le *type de stimuli* employé. Selon l'approche écologique Gibsonnienne (Gibson, 1966) le stimulus n'est pas uniquement une occurrence se passant au niveau d'un récepteur sensoriel sans contexte ou information sur sa source dans le monde, mais il est plutôt un riche événement multimodal impliquant des objets, des surfaces et leurs relations. Par ailleurs, Neisser (1976) souligna que les stimuli écologiquement valides impliquent une perception multimodale de l'information et son intégration au sein d'un flux spatio-temporel continu, c'est à dire une information nécessitant de multiples sens pour la percevoir et la comprendre, présentée dans son ensemble dans son contexte naturel. D'ailleurs, ces dernières années, il a souvent été proposé par la communauté des neurosciences sociales d'utiliser des stimuli écologiques afin d'améliorer nos connaissances sur l'interaction sociale (Schilbach et al., 2012). Il a été soutenu que l'ajout d'un deuxième être humain dans ces expériences pouvait être une solution viable afin d'améliorer la validité écologique (Di Paolo & De Jaegher, 2012; Hari & Kujala, 2009).

La troisième et dernière dimension de validité écologique est *la réponse des participants* aux stimuli présentés. En effet, il est question ici de savoir si les réponses du sujet sont naturelles et représentatives du comportement le plus approprié lors de de la situation expérimentale ou si elle est biaisée parce que sollicitée artificiellement. Ce problème a été soulevé par Bronfenbrenner (1977) dans le contexte de la psychologie du développement. L'auteur soutenait que la psychologie du développement devenait la "science de l'étrange comportement des enfants dans des situations étranges avec des adultes étranges lors de périodes les plus brèves possibles". En effet, il est difficile d'évaluer les effets sur cette dimension car elle interagit avec les biais et les attentes internes de l'expérimentateur. Une solution pourrait être d'agir sur les deux dimensions précédentes en fournissant une situation socialement significative, en introduisant par exemple un autre être humain comme stimulus. Ainsi la réponse du participant serait plus authentique. Cependant, rappelons que

la perception du regard de l'autre module les performances socio-cognitives, et pourrait avoir un effet sur la réponse expérimentale (Senju & Johnson, 2009). Di Paolo & De Jaegher (2012) appellent la capacité à s'engager avec un autre être humain dans une interaction la "*disposition à interagir*". Ils soutiennent qu'un environnement et un contexte favorable pourraient aider à recréer une situation d'imprévu social entraînant le besoin de se mettre dans disposition de communication (Jordan, 2009).

Le maintien de la validité écologique à travers les trois dimensions décrites précédemment se fait habituellement aux dépens du contrôle expérimental et vice versa. En effet, les tentatives pour renforcer l'un affaiblissent l'autre. Aussi, un compromis peut être atteint et sera optimal si l'on sacrifie la validité écologique dans certaines dimensions tout en le maintenant dans les autres (Schmuckler, 2001). Un bon équilibre entre contrôle expérimental et validité écologique est un enjeu majeur dans la conception des études en hyperscanning (**Figure 2.1**).



**Figure 2.1 : Taxonomie de différents designs expérimentaux en interaction musicale, tiré de d'Ausilio et al. (2015).** Le degré d'interaction sociale augmente de gauche à droite alors que le degré de contrôle expérimental diminue. Sur ce continuum on remarque que le potentiel de couplage comportemental augmente (unidirectionnel à multidirectionnel) avec le nombre de participants.

## b. La composante émotionnelle

La plupart des contacts que nous avons avec d'autres personnes au cours d'une journée ou dans l'ensemble de notre vie sont teintés d'émotions (Dolan, 2002). Notre cerveau est sans arrêt bombardé par des stimuli simultanés (Seeley et al., 2007), et afin d'en extraire les éléments importants, les événements pertinents (comportementaux et/ou environnementaux) doivent être traités en priorité (Dolan, 2002; Fecteau & Munoz, 2006; Seeley et al., 2007). D'un point de vue évolutif, les émotions ont émergé afin de créer un mode de priorité pour le traitement perceptif attentionnel (Dolan, 2002). Les émotions sont la "toile de fond" constante qui nous accompagne dans notre vie quotidienne, affectant considérablement notre comportement et nos attitudes (Forgas,

2003). Notre capacité à gérer ses émotions est reliée à la qualité des interactions sociales (Lopes et al., 2004). Ainsi, le manque de réactivité émotionnelle peut conduire à un comportement irrationnel voir même pathologique (Damasio et al., 1994). Être capable de reconnaître les émotions chez un autre être humain implique de nombreux mécanismes psychologiques et neurologiques (Adolphs, 2002b). Celles-ci sont une composante importante dans la reconnaissance des intentions et de l'état d'esprit des autres, même chez les jeunes enfants (Harris et al., 1989; Leppänen & Nelson, 2009). Identifier les émotions chez les autres dépend certainement de mécanismes neuronaux qui génèrent des affects similaires chez le perceuteur, permettant le partage d'états émotionnels entre individus (Preston & De Waal, 2002). Il existe une théorie populaire sur l'empathie connue sous le nom "d'hypothèse de réseau partagé", selon laquelle le fait d'observer ou d'imaginer une autre personne dans un état affectif particulier active une représentation du même état dans l'observateur avec les mêmes réponses autonomes et somatiques (Lamm et al., 2011). En effet, dans un article récent, Anders et al. (2011) ont démontré que lorsque des partenaires romantiques, scannés alternativement dans un IRMf, communiquaient leurs émotions par des expressions faciales, des informations spécifiques aux affects étaient encodées dans des réseaux cérébraux similaires chez les deux participants. En outre, ils ont trouvé qu'il existait une spécificité temporelle dans le flux des informations allant de l'expéditeur à l'observateur. En effet, lorsque l'information émotionnelle était retardée dans le cerveau de l'expéditeur, la réponse était autant retardée dans le cerveau de l'observateur (Anders et al., 2011). Ce phénomène démontre que l'information émotionnelle a été ajustée de manière dynamique entre les cerveaux de chaque partenaire, et ne porte pas seulement des informations "prototypiques". Ce *partage émotionnel* pourrait alors fournir des informations pertinentes sur les états mentaux d'autrui, en complément des indices non-émotionnels. Aussi, ce partage est considéré comme un précurseur de l'empathie et peut affecter la motivation à communiquer et à coopérer avec quelqu'un d'autre (De Vignemont & Singer, 2006; Preston & De Waal, 2002). Les réponses émotionnelles peuvent être considérées comme un catalyseur influençant le comportement social et notre volonté à nouer des relations avec les autres. En ce sens, il a été constaté récemment que les émotions peuvent améliorer le couplage cérébral entre les participants. Ainsi, il a été mis en évidence une augmentation de la puissance de cross-corrélation sur la bande de fréquence thêta-alpha (6-12 Hz) entre les participants lors de l'écoute d'une voix familière, ou une augmentation de la corrélation inter-sujets des réseaux cérébraux permettant le traitement des émotions lorsque l'on éprouve des affects de valence négatives en regardant un film (Kawasaki et al., 2013; Nummenmaa et al., 2012). Les situations expérimentales conduisant à l'engagement émotionnel pourraient contribuer à la compréhension des interactions sociales, et améliorer la validité écologique des participants coopérant à une même tâche. De cette manière, susciter des

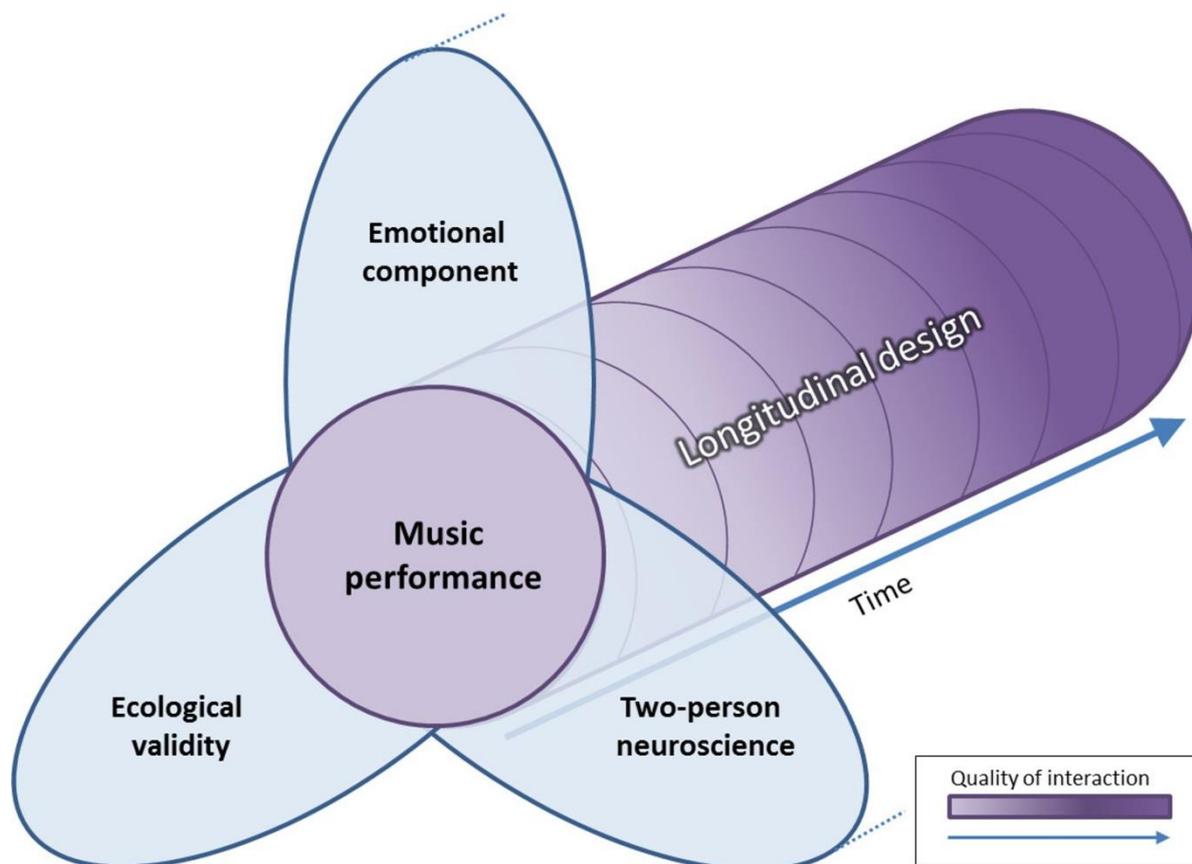
émotions expérimentalement peut être une solution pertinente et adaptée aux études en hyperscanning. Il faut noter aussi qu'il est important de laisser aux participants la liberté de lire les indices émotionnels supportés par les yeux ou le visage en utilisant une modalité d'imagerie appropriée (i.e., EEG, fNIRS). Cependant, la plupart des études de hyperscanning n'ont pas pris explicitement en compte la composante émotionnelle.

### **c. Le design longitudinal**

L'interaction humaine est parfois éphémère, un mot ou deux avec un étranger sans impact pour l'avenir, du moins c'est ce qu'il paraît. D'autres fois, elle s'étend sur de plus longs moments voire même de très longues périodes. L'ensemble des événements que l'on a partagé avec les personnes appartenant à nos cercles sociaux est fondamental pour la définition de soi, et ces liens sociaux évoluent en permanence au fil du temps. L'étude décrite dans le chapitre précédent par King-Casas et al. (2005) a été menée en utilisant un paradigme de transaction économique sur plusieurs séries en utilisant l'IRMf. Les auteurs constatèrent que lorsque la relation était de confiance, l'amplitude de la réponse dans le noyau caudé corrélait avec l'intention de faire confiance dans les tours suivants. Alors que la réputation se construisait entre les participants au cours du temps, le signal de confiance apparaissait 14 secondes plus tôt lors des essais suivants, précédant la décision de l'investisseur. Le transfert temporel du signal de confiance montre qu'il est passé de réactif à anticipatoire. Ainsi, les auteurs supportèrent l'idée que l'activité noyau caudé pourrait refléter le développement de la réputation grâce à la construction d'un modèle de l'investisseur dans le cerveau du partenaire. Cette étude suggère, avec pour base des corrélats simultanés dans les structures cérébrales correspondantes, que les participants étaient en mesure de former une représentation mentale de leur partenaire et d'agir en conséquence lors des essais suivants. Les sujets présentèrent un comportement adaptatif de prédiction de récompense comme on le voit dans les modèles d'apprentissage par renforcement lors d'interactions avec d'autres personnes (Berridge, 2000). Les modifications structurelles du cerveau vont de pair avec les modifications comportementales, comme il est possible de l'observer, par exemple, dans la formation musicale. Dans une étude avec des enfants de 6 ans, d'importants changements structurels du cerveau ont été constatés après 15 mois de leçons hebdomadaires de piano, ainsi qu'une amélioration des compétences motrices et auditives associées à la musique (Hyde et al., 2009). De plus, des études démontrèrent que la pratique de la musique améliore grandement le développement des compétences personnelles et sociales chez les enfants (i.e., augmentation de l'estime de soi, plus grande motivation et sentiment d'auto-efficacité) et donc a un effet positif dans le temps (Hallam,

2010). Plusieurs chercheurs émirent des théories quant au développement en début de vie des compétences sociales et des mécanismes cérébraux associés. Di Paolo & De Jaegher (2012) discutèrent de deux composantes de leurs Hypothèse d'Interaction Cérébrale (Interaction Brain Hypothesis : IBH): contemporaine (CIBH) et de développement (DIBH). Le DIBH est décrit comme suit: *"Les fonctions des mécanismes cérébraux impliqués dans la compréhension sociale ont été façonnées au cours du développement par de nombreux engagements habiles lors d'interactions sociales, où des processus interactifs ont été impliqués dans la performance sociale de façon contextuelle"*. Ce point de vue théorique implique que lors des interactions sociales, les mécanismes cérébraux évoluent et mûrissent au fil du temps. Par conséquent, la réalisation d'expériences d'interaction sociale avec une population jeune pourrait augmenter les chances de trouver des changements neurophysiologiques; à vrai dire, seules des études longitudinales peuvent mettre en évidence des changements comportementaux et/ou cérébraux au cours du temps sur le même participant. En outre, les designs longitudinaux présentent deux avantages: ils favorisent naturellement la validité écologique, puisque l'interaction sociale quotidienne s'étend souvent sur de longues périodes, et ils permettent la corrélation de l'évolution des performances comportementales avec des mesures objectives des phénomènes de couplage cérébraux dans le temps.

Concevoir une expérience satisfaisant l'équilibre entre validité écologique et contrôle expérimental, en utilisant un design longitudinal, lors d'une interaction continue et tout en permettant l'engagement émotionnel, peut être difficile. Néanmoins, il existe une activité humaine particulière qui pourrait remplir ces critères: la performance musicale (**Figure 2.2**). Dans la section suivante, nous présentons la musique du point de vue des neurosciences en faisant un bref historique du point de vue évolutionniste. Nous décrivons ensuite son lien avec une cognition en particulier: l'émotion. Enfin, nous expliquons succinctement l'effet de la musique sur le cerveau entraîné d'un musicien.



**Figure 2.2 Les avantages de la performance musicale au cours du temps en tant que paradigme expérimental pour étudier les interactions sociales en neuroscience.**

Il existe trois caractéristiques fondamentales à prendre en compte, conseillées par des auteurs en neurosciences sociales lors de l'étude des interactions sociales. Premièrement, la validité écologique suppose que les stimuli et que l'environnement expérimental doivent refléter aussi étroitement que possible la vie réelle. Deuxièmement, il a été trouvé que les émotions pourraient être un catalyseur de l'interaction sociale et qu'elles favoriseraient le couplage cérébral. Troisièmement, l'introduction d'un autre être humain en tant que stimulus dans les études en neurosciences favorise une vue éactive de l'interaction humaine plutôt que le paradigme de l'observation, norme en neurosciences classique. Au carrefour de ces trois notions se dresse la performance musicale. Nous soutenons l'idée qu'avec l'utilisation d'un design longitudinal et d'une modalité de neuroimagerie appropriée, il serait possible de décrire les étapes de la construction d'une relation musicale à travers plusieurs dimensions (i.e., comportementale, émotionnelle et neuronale). De plus, la qualité de l'interaction humaine dans ces dimensions (i.e., une meilleure performance, un sentiment d'unité, et le changement de réseau neuronal) peut s'améliorer au fil du temps.

## II. Performance musicale

### a. La musique, au centre de la cognition

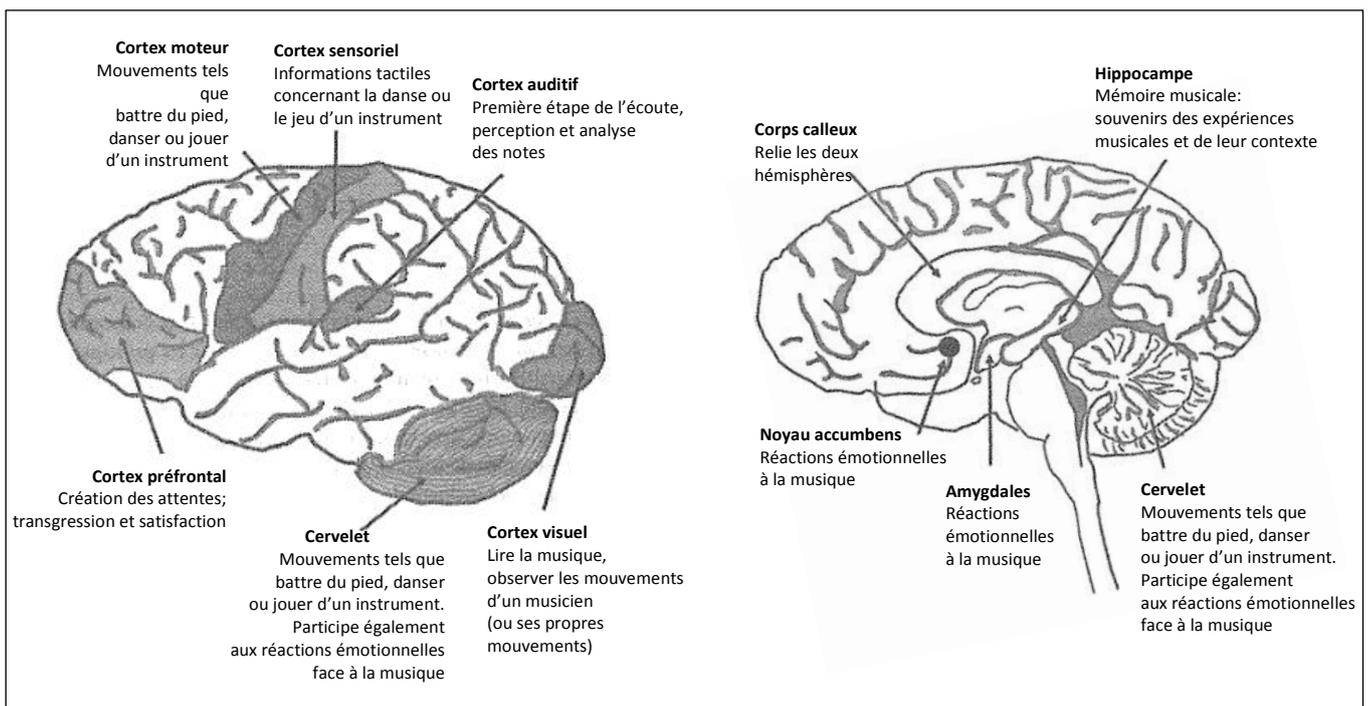
Le fait que la musicalité est un élément fondamental de l'être humain, que cette capacité est une caractéristique évolutive très ancienne, qu'elle fut un protolangage holistique d'expression émotive antérieure au langage et qu'elle fut essentiellement son précurseur a souvent été débattu (Mithen, 2005). En effet, non seulement les oiseaux, mais aussi des baleines, les dauphins, et les singes de l'ancien et du nouveau monde chantent pour communiquer les uns avec les autres (Hauser & McDermott, 2003). La musique a été jugée importante dans l'interaction sociale pour plusieurs

raisons, aussi connues comme étant les "7-C". Elle est impliquée dans le Contact social, améliore la Cognition sociale, permet la Co-pathie, la Communication, la Coordination des actions, la Coopération et favorise la Cohésion du groupe (Koelsch, 2014). La musique possède le pouvoir de nous faire voyager à travers les âges (Jancke, 2008); elle éveille nos sens à un âge précoce et marque nos souvenirs d'enfance. Ces aspects sociaux de la musique combinés avec sa capacité à évoquer des émotions en fait un outil précieux pour l'étude des émotions sociales et de leurs corrélats neuraux (Koelsch, 2014).

C'est parce qu'elle requiert la presque totalité des cognitions que cette discipline a été un domaine de recherche prolifique en neurosciences depuis ces dernières décennies (**Figure 2.3**), en particulier avec les études sur la motricité ou sur la perception auditive (Zatorre et al., 2007), la mémoire (Chan et al., 1998), la langue (Patel, 2003) et les émotions (Blood & Zatorre, 2001). Les neurosciences de la musique sont un domaine riche et en croissance reposant sur un vaste corpus de littérature décrivant les mécanismes neuronaux de traitement de la musique. Ces connaissances se basent sur des études avec des patients souffrant de lésions cérébrales mais aussi sur des expériences avec des participants sains en utilisant un grand panel de modalités expérimentales (Ayotte et al., 2000; Bhattacharya et al., 2001; Di Pietro et al., 2004; Meister et al., 2004). Plus important encore, la performance musicale possède des propriétés intéressantes pour l'étude des interactions sociales. Par exemple, elle comprend trois fonctions élémentaires de commande motrice: timing, séquençage, et organisation spatiale des mouvements (Zatorre & Halpern, 2005). Le timing et le rythme sont des composants essentiels de la performance de la musique, car les variations de ces deux paramètres peuvent décrire de très différents styles musicaux. La répétition de motifs rythmiques, comme le refrain dans la structure d'une chanson, sont typiques des productions musicales. Ceci permet d'obtenir un excellent cadre pour des expériences en situation contrôlée. En effet, la répétition est un critère incontournable pour améliorer le rapport signal-sur-bruit de données en EEG et /ou la puissance des analyses statistiques inférentielles. Même dans l'improvisation de groupe, en jazz par exemple, où chaque musicien doit coopérer pour produire une construction musicale collective, cohérente, et émergente sans apprentissage préalable, il existe des règles rythmiques à suivre (progression d'accords, rythme harmonique (Randel, 2003; Russo, 1997; Swain, 2002)).

L'improvisation musicale est un paradigme intéressant lorsque l'on étudie les bases neurales de l'interaction sociale parce qu'il nécessite un réarrangement et une coopération constante entre les musiciens de manière à créer quelque chose d'harmonieux. Di Paolo et al. (2012) font la remarque que la notion de *transition* dans la coordination est particulièrement intéressante. L'interaction humaine réside dans la rupture et la reconstruction de points d'équilibre. L'oscillation

entre ces deux états ainsi que le phénomène de compréhension conjointe, où les actions et les intentions sont co-construites, peuvent généralement être observés pendant l'exécution musicale, en particulier lors de l'improvisation. Par ailleurs, l'harmonie musicale dépend de notre retour auditif. Le "feedback" est présent quand l'action motrice précède sa perception auditive, et est une notion particulièrement pertinente dans les tâches où la production musicale doit être contrôlée en permanence (i.e., l'improvisation ou le chant). Si le feedback auditif est bloqué, les musiciens peuvent encore exécuter un morceau préalablement mémorisé et bien pratiqué, mais la performance se fait souvent au détriment de la retranscription des émotions (Repp, 1999). Le feedback auditif est l'une des deux classes d'interaction audio-motrice, l'autre étant "l'interaction feedforward". Dans ce cas, le système auditif influence l'exécution motrice d'une manière prédictive, par exemple quand un auditeur tape son pied au rythme d'une musique, anticipant les accents rythmiques (Large & Palmer, 2002). Pour réaliser cette action, l'auditeur doit aussi employer une autre propriété intéressante mise en jeu lors de la performance musicale : il doit *apprendre* le bon rythme.



**Figure 2.3 Régions cérébrales clés associées à l'activité musicale.** (Tiré de Levitin, 2006)

En effet, savoir jouer d'un instrument et être capable d'y jouer au sein d'un groupe n'est pas inné. Il est nécessaire de le pratiquer régulièrement seul ainsi qu'avec d'autres musiciens. La répétition de ce processus d'apprentissage permet aux musiciens d'affiner leur technique, entraînant des changements anatomiques et physiologiques du cerveau (Münste et al., 2002). Aussi, la musique est une tâche sociale multimodale engageante. Jouer d'un instrument est accompagné de toute une

série de mouvements particuliers, engageant souvent tout le corps, qui sollicite naturellement des mouvements et des expressions chez les autres joueurs, chanteurs et danseurs. La contagion sociale, physique et émotionnelle résultante améliore les expériences sociales telles que l'apprentissage, l'imitation, la compréhension mutuelle, le rire, le sentiment d'unité, ce qui fait que la performance musicale un catalyseur puissant des relations sociales. Selon le Shared Affective Movement Expérience (modèle SAME), le son musical comporte des informations cognitives et émotionnelles issues de l'action générant la musique (Overy & Molnar-Szakacs, 2009). Les émotions sont étroitement liées à l'écoute de musique et à sa production (Juslin & Sloboda, 2001). La capacité de la musique à transmettre différents états émotionnels est connue pour se développer tôt dans l'enfance, et s'améliore de manière significative au cours du développement (Dowling, 1999). Comme la musique peut véritablement évoquer des réponses émotives sans dissimulation ou tromperie expérimentale, nous considérons qu'il s'agit d'une excellente tâche pour explorer l'interaction sociale. En particulier, la possibilité d'apprendre une partition de musique sur une longue période de temps peut être une caractéristique pratique pour concevoir des expériences longitudinales. En outre, cette activité est compatible avec les modalités actuelles d'imagerie telles que l'EEG, NIRS et IRMf (Blood & Zatorre, 2001; Müller et al, 2013.).

C'est par ces propriétés que nous considérons la musique comme une discipline de choix pour étudier l'interaction entre les personnes. Les échanges musicaux dans un groupe ou un orchestre s'apparentent à une discussion mettant finement en jeu l'ensemble des systèmes cognitifs. Il en résulte une création réalisée à plusieurs qui montre une fois de plus, conforme à la pensée gestaltiste, que *le tout est autre que la somme de ses parties* (Wertheimer, 1938). Ce sont ces phénomènes émergents que nous nous efforçons de capturer dans ce manuscrit.

## **b. Les origines**

Commençons ce voyage au centre du 4<sup>e</sup> art par un saut temporel non pas dans la préhistoire, mais en 1997 au M.I.T. lors du discours d'ouverture. Invité pour l'occasion, Steven Pinker qui venait de terminer son ouvrage sur les Sciences Cognitives "How the Mind Works" (Pinker, 1997), déclara alors que "le langage est un produit incontesté de l'évolution, ainsi les mécanismes que nous étudions, tels que la mémoire, l'attention, la catégorisation ou la prise de décision, ont un but défini en termes d'évolution". Il rajouta cependant qu'il existe des attributs ou comportements n'ayant pas de fonctionnement évolutionnaire précis. De cette manière, la musique serait par exemple un phénomène dérivé du langage n'héritant pas de la même puissance et profondeur. "La musique est

un cheesecake auditif : nous apprécions le gâteau à la crème et au sucre non pas parce que nous avons développé un goût préférentiel pour les pâtisseries, mais parce que nous avons élaboré une circuiterie de récompense s'activant lorsque nous trouvons le sucré des fruits, le gras des viandes et des noix, la fraîcheur de l'eau de source, autant de denrées rares et bénéfiques pour notre bien-être. Le cheesecake est un uppercut sensuel dirigé vers nos sens, inégalable et introuvable dans la nature : c'est une concoction chargée de mégadoses de stimuli agréables ayant pour simple but d'écraser répétitivement le bouton plaisir de notre circuiterie" (Pinker, 1997).

Selon Pinker, la musique n'aurait pas réellement de but évolutif, mais ne serait qu'un délice dérivant du langage employant la même circuiterie cérébrale, au même titre que la littérature ou les autres arts, héritant ainsi d'une apparition "accidentelle" (Carroll, 1998). Il n'était pas le seul à adopter cette vision. En effet, le cosmologiste John Barrow et le psychologue Dan Sperber déclaraient en harmonie que la musique ne jouait aucun rôle dans la survie de l'espèce, ce dernier alla même jusqu'à la qualifier de "parasite évolutionnaire" (Sperber, 1996).

De telles déclarations d'une personne telle que Pinker ont entraîné une réaction de la communauté scientifique de la musique et ont engagé la remise en question de ses origines (Levitin, 2006). De la sorte, plusieurs chercheurs croient que la pensée artistique aurait pu être bénéfique et essentielle à nos ancêtres (Cosmides & Tooby, 1995; Gazzaniga, 2008). Notamment la capacité à s'engager dans, et apprécier, une réflexion d'événements non avenus. Dans leur imagination ils auraient pu rejouer et améliorer des scénarios impliquant d'autres personnes de leur entourage, dans une situation de chasse ou une confrontation avec un prédateur. Toutes ces capacités sont issues de notions maintenant bien connues de la cognition humaine, soit la théorie de l'esprit (Gallagher & Frith, 2003), la pensée abstraite et la récursivité (Cosmides & Tooby, 1995; Levitin, 2008). Cosmides et Tooby (1995) affirment que la pratique de la musique pourrait avoir fonction de préparer l'enfant en développement à des activités sociales et cognitives complexes comme le langage en leur permettant de l'envisager dans un contexte différent. Les bébés n'assimilent pas tous les mots dans l'ordre des énoncés qu'ils entendent, ils apprennent les règles de leur langue maternelle, essayent de les appliquer à des cas qu'ils n'ont pas encore observés et font des erreurs, car à toutes règles il y a des exceptions. C'est pourquoi il est possible d'entendre des enfants parler des "belgicains", habitants de Belgique, après qu'ils aient appris que les australiens vivent en Australie, les américains en Amérique et les italiens en Italie. Une notion découlant de cette idée est la propriété générative du langage. Nous sommes capables de créer de nouveaux énoncés sans jamais les avoir entendus auparavant et de les décliner sous toutes les formes possibles tout en restant dans les règles, ce qui est le cas aussi pour la musique. D'ailleurs, dès l'âge de cinq ans, la

plupart des enfants sont capables de reconnaître les règles de la musique de leur culture et d'en chanter un large répertoire en suivant ces règles (Dowling, 1999). La fonction musicale aide le bébé à se familiariser avec la prosodie du langage par le biais du babillage avant l'intégration de données plus complexes comme la phonétique. Il est par ailleurs intéressant de rappeler que dans l'ensemble des cultures, l'interaction entre une mère et son bébé se fait très souvent par des mouvements rythmiques (bercer) et du chant (berceuse), faisant de la musique l'un des premiers facteurs de cohésion sociale (Trehub et al., 1997).

Imaginons-nous maintenant lors d'un concert, un groupe talentueux commence à jouer un rythme entraînant, le chanteur occupe la scène par sa présence et, en regardant la foule, frappe ses mains. Très rapidement notre voisin bat la mesure à la même cadence, puis un autre plus loin et encore un autre jusqu'à ce que nous ressentons le besoin de suivre l'ensemble de la salle dans cette coordination de grande envergure (Demos, 2012; Oullier, 2008). Le fait de jouer ou écouter ensemble de la musique rapproche les individus. Comme le dit Aristote, "l'Homme est un animal social" et la musique encourage le rassemblement et la synchronisation. Si l'on pense une fois de plus à nos ancêtres, chanter autour d'un feu en montant la garde lors d'une froide nuit pour protéger le village contre des prédateurs pouvait être un bon moyen de se redonner du cœur à l'ouvrage, motiver ses congénères et rester éveillé. La musique peut être aussi vectrice d'identité de groupe et de sentiment d'appartenance à une communauté d'une façon plus profonde que n'importe quel autre type de rassemblement. Ses membres ne définissent pas à priori quelles seront les valeurs exprimées dans leur groupe, ils ne trouvent leur identité en tant que groupe qu'à travers leur activité culturelle. Jouer de la musique est plus qu'une manière d'exprimer ses idées, c'est un moyen de les vivre (Frith, 1996). Cette idée est très forte chez les adolescents en recherche d'identité, et souvent le style de musique écouté peut véhiculer cette idée de "badge identitaire" (North & Hargreaves, 1999), privilégiant leurs relations avec ceux préférant cette même musique sans nécessairement dénigrer les autres. Par ailleurs, comme l'affirme Miller, la musique peut fonctionner comme moyen de séduction, en particulier chez les jeunes hommes cherchant à attirer les jeunes femmes (Miller, 2001). De plus, c'est souvent à l'âge de l'adolescence que nous avons le plus de chance de créer un groupe de musique avec ses amis et d'écrire nos premières chansons, qu'elles parlent d'amour ou non.

Pour reprendre notre première idée sur l'utilité de la musique chez nos ancêtres, sa création, que ce soit sa composition ou son improvisation, peut être appréhendée comme un exercice compliqué d'arrangement et de réarrangement d'éléments de hauteur de ton et de rythme au cours du temps ; un entraînement de flexibilité cognitive exerçant le réseau attentionnel. D'un point de vue évolutionniste, démontrer de telles compétences peuvent être perçus comme un "signal"

d'adaptabilité et de souplesse émotionnelle (Cross & Woodruff, 2009; Miller, 2000; Sluming & Manning, 2000). Un autre aspect de la musique à ne pas oublier est le fait qu'à l'origine elle était toujours accompagnée de mouvements, danses et autres tapements du pied, que même de nos jours nous ne pouvons réprimer lorsque nous entendons une chanson entraînante. Nos ancêtres, dansant et chantant pendant des heures lors de danses tribales, créant de nouveaux thèmes musicaux, pouvaient ainsi démontrer leurs aptitudes physiques et cognitives à de potentiels partenaires ; des capacités utiles en cas d'altercation avec un prédateur, de création d'habitats solides dans un environnement hostile, de chasses longues et éprouvantes, ou encore d'autres situations périlleuses requérant la survie de l'individu.

La musique possède un rôle dans la sélection sexuelle. Dans *La Descendance de l'Homme*, Darwin décrit qu'elle jouerait un rôle dans la séduction du sexe opposé, au même titre que la queue du paon, et, d'instinct nous l'utiliserions en tant qu'index de compatibilité sexuelle avec l'autre. Une étude astucieuse de Martie Haselton et Geoffrey Miller de l'Université de Californie de Los Angeles (UCLA) a demandé à des femmes de noter l'attraction qu'elles pouvaient avoir envers des hommes décrits sur des fiches lors de différentes périodes menstruelles. Il existait deux catégories : des artistes très créatifs et d'une grande intelligence n'ayant malheureusement pas eu de chance du côté financier, et des hommes très riches d'une créativité et intelligence moyenne. L'intelligence devait être perçue comme endogène, donc héréditaire, tandis que la richesse était due à des faits exogènes donc non héréditaire. Lorsque les femmes étaient en période d'ovulation, leur choix était significativement en faveur de l'artiste tandis que lors d'une autre période il se portait sur l'autre alternative. Suite à ses résultats, Haselton et Miller en déduisirent que la richesse pouvait être l'apanage de la personne pouvant le mieux subvenir aux besoins de leurs enfants dans le temps, mais que la créativité quant à elle pouvait être celui des meilleurs gènes (Haselton & Miller, 2006).

### **c. Les émotions**

Comme l'a si bien écrit William Shakespeare, "La musique est l'aliment de l'amour". L'émotion étant omniprésente autant dans l'amour que dans la musique, sa dynamique nous transporte et nous fait voyager vers des destinations inconnues. En effet, lorsqu'on demande quelles ont été les sensations ressenties pendant leur expérience musicale la plus forte à des participants, certains rapportent avoir eu des expériences mystiques proches de Dieu avec une composante physiologique forte (Gabrielsson & Wik, 2003). C'est parce que la musique a ce pouvoir émotionnel que la plupart des personnes passent autant de temps à l'écouter (Juslin & Sloboda, 2001). D'ailleurs, dans ses travaux de 1871, Nietzsche considérait que la transmission d'émotion était la fonction, voir

même l'essence de la musique. Les émotions en musique et leurs effets sur le cerveau sont un sujet de plus en plus étudié dans les neurosciences depuis cette dernière décennie. Ainsi certaines études lésionnelles ont pu démontrer que le système cérébral responsable de l'analyse émotionnelle lors d'un stimulus musical était indépendant de la reconnaissance de ce stimulus lors de dommages cérébraux bilatéraux (Peretz & Gagnon, 1999). Ce résultat suggère que l'identification de la valence émotionnelle musicale ne repose pas sur des déterminants perceptuels jouant un rôle dans la reconnaissance d'une musique. Il a été longtemps admis que le mode sur lequel une pièce était jouée, majeure ou mineure, était associé à l'émotion véhiculée par un morceau, joyeux ou triste (Peretz et al., 1998). Cependant il semblerait qu'il ne s'agisse en fait que du résultat de l'apprentissage des règles musicales de la culture occidentale, étant donné que d'autres systèmes (musique indienne, orientale) ne retrouvent pas du tout ces mêmes associations (Balkwill et al., 2004; Trehub, 2003). De plus en plus d'études se sont affairées à essayer de caractériser l'expérience émotionnelle lors d'une écoute musicale. Typiquement, la musique classique provoque de fortes émotions chez son auditoire accompagnées d'un sentiment de plaisir (Juslin & Sloboda, 2001; Krumhansl, 1997). D'ailleurs, une telle expérience est souvent accompagnée de réponses physiques comme des frissons, un changement de rythme cardiaque ou un état d'excitation générale (Panksepp, 1995).

Au niveau neuroanatomique, il a été démontré que les aires corticales orbito-frontale, frontale polaire et du gyrus cingulaire étaient des structures cérébrales importantes lors de l'écoute d'une musique plaisante et non dissonante (Blood et al., 1999). Il a par ailleurs été découvert que les frissons ressentis lors d'un événement musical fort étaient en corrélation avec l'augmentation de l'activité dans l'amygdale, dans le mésencéphale dorso-médial et surtout dans celle du striatum ventral gauche, structure reliée à la récompense (Blood & Zatorre, 2001). Une série d'études a voulu explorer cette question de la récompense et de la musique. Il a été découvert que l'aire tegmentale ventrale (ATV) était mise en jeu lors de son écoute. L'ATV est connue pour son lien dopaminergique avec le noyau accumbens (Kelley & Berridge, 2002) et leur responsabilité dans la réponse à la récompense. Or, il a été trouvé qu'en contexte d'écoute musicale, l'ATV gère l'activité du noyau accumbens, de l'hypothalamus, de l'insula et du cortex orbitofrontal par des chemins dopaminergiques, le tout créant un réseau responsable des réponses physiques rapportées par les auditeurs appréciant une musique plaisante (Menon & Levitin, 2005). De plus, dans une autre étude en tomographie par émission de positron (TEP) il a été démontré que l'hippocampe s'activait davantage dans des conditions de musique agréable, alors que le gyrus parahippocampique, était plus actif lors de musique dissonante (Koelsch, 2006). L'ensemble de ces réseaux, avec l'amygdale et

les pôles temporaux, semble être considérés comme étant la base de tous les traitements cérébraux émotionnels relatifs à la musique (Koelsch et al., 2006).

Beaucoup d'amateurs de musique déclarent l'utiliser pour réguler leur humeur et peuvent même trouver du réconfort dans une musique triste (Chamorro-Premuzic & Furnham, 2007). En effet, une musique entraînant et joyeuse est diamétralement opposée au sentiment de tristesse ; elle peut irriter les personnes dans un état affectif différent et entraîner une sensation d'isolement, comme si personne ne les comprenait. A l'inverse, une musique triste peut rassurer parce qu'elle est plus proche de la situation affective de l'auditeur, ce dernier peut se sentir moins seul et plus compris (Chamorro-Premuzic & Furnham, 2007).

D'un point de vue neuroanatomique, l'état émotionnel induit par de la musique classique mélancolique réquisitionne l'hippocampe, l'amygdale et les aires auditives associatives, alors qu'en contraste, une musique classique joyeuse met en jeu le striatum ventral et dorsal gauche, le gyrus cingulaire gauche et le gyrus parahippocampique gauche, ainsi que les aires auditives associatives (Mitterschiffthaler, 2007). Il est aussi intéressant de considérer que la musique se joue souvent dans un contexte et que les émotions induites ou amplifiées sont souvent reliées à cette situation. Ainsi, dans un film comme "Il faut sauver le soldat Ryan" (Steven Spielberg, 1998, Amblin Entertainment, Mutual Film Company), la musique peut aider à amplifier une scène dramatique, qui sans elle, pourrait être beaucoup moins émotionnelle. C'est dans ce genre de contexte audio-visuel que l'on peut voir une augmentation de l'activation de l'amygdale. D'ailleurs, si l'on enlève cet environnement, la musique positive ou négative ne suffit pas à provoquer cette augmentation (Eldar, 2007). Ce résultat suggère qu'un contexte écologique aide à construire une image émotionnelle plus engageante, mettant en jeu l'amygdale de façon différentielle.

Pour finir, il existe une différence entre les musiciens et les autres personnes dans le traitement des émotions dans la musique. En effet, une étude en potentiel évoqué a su démontrer que, lorsque les musiciens perçoivent des mélodies ayant la même longueur, le même tempo et le même rythme mais avec un mode différent, ils affichent une composante positive tardive appelée P300 lors de l'écoute des morceaux en mode mineur (Halpern et al., 2008). Cependant, ni les musiciens, ni les non-musiciens n'affichent cette composante lors d'un mode majeur, ce que les auteurs expliquent comme étant une fois de plus l'effet de la culture musicale (ici occidentale) sur le traitement du mode. Par conséquent, le mode mineur semblerait agir comme un stimulus du paradigme "oddball" demandant un traitement supplémentaire.

## d. Performance, expertise et entraînement

S'entraîner régulièrement à une activité peut avoir des conséquences sur l'organisation des tissus cérébraux, soit par extension ou réduction de la matière grise en fonction des stimuli et niveaux structuraux examinés (Münste et al., 2002). Il devrait être donc possible de voir des changements dans la structure cérébrale des musiciens comparés aux non-musiciens, et c'est dans le cortex moteur que les premiers indices peuvent être examinés. En effet, il a été clairement démontré qu'ils présentaient des différences anatomiques structurelles (Gaser & Schlaug, 2003) et fonctionnelles (Krings et al., 2000), ainsi que changements au niveau des autres structures reliées à la motricité, telle que le cervelet et le corps calleux (Hyde et al., 2009). De plus, les musiciens démontrent une augmentation de l'activité dans les aires motrices lors de la perception de rythme comparé à des personnes n'ayant pas d'entraînement musical (Grahn & Brett, 2007). Une étude intéressante en MEG par Elbert (1995) a étudié la stimulation somatosensorielle des mains de joueurs d'instruments à corde. L'analyse des sources a révélé que la représentation corticale des doigts de la main gauche des musiciens, la main servant à pincer les cordes, était plus grande que chez les non-musiciens (Elbert, 1995). Il n'y a eu cependant aucune différence mise en évidence entre les deux groupes en ce qui concerne la main droite, la main servant à gratter les cordes. De plus, la réorganisation corticale de la représentation des doigts était plus prononcée chez les musiciens ayant commencé leur apprentissage plus tôt dans leur vie. A l'inverse, une étude en IRMf s'intéressant au mouvement séquentiel des doigts a découvert une réduction de l'activité du cortex moteur chez les pianistes professionnels par rapport à des personnes sans entraînement (Hund-Georgiadis, 1999), ce qui suggère que l'expertise dans une tâche n'entraîne pas toujours une augmentation de l'activité dans les circuits associés, ni une augmentation de la masse tissulaire.

Les changements dans la plasticité du cerveau ne concernent pas uniquement la fonction motrice chez les musiciens. Le cortex auditif est un organe très plastique. En effet chez les personnes sourdes depuis la naissance ce cortex se voit redessiné dans le but de traiter les informations visuelles à la place (Neville et al., 1998; Petitto et al., 2000). Aussi Pantev (1989) a pu montrer grâce à la MEG que les réponses cérébrales déclenchées par les notes d'un piano chez les pianistes étaient 25% plus grandes que celles des non-musiciens (Pantev et al., 1998). Il semblerait par ailleurs que ces réponses soient plus prononcées pour l'instrument correspondant à chaque musicien, suggérant fortement une plasticité dépendante de l'utilisation de cet instrument (Tervaniemi, 2003). D'autre part, les violonistes écoutant leur instrument joué par quelqu'un d'autre démontrent une activité en EEG sur la bande gamma spécifique au timbre et à la qualité sonore du violon (Shahin, 2008). Cette réponse spécifique est aussi présente chez les enfants après un an d'apprentissage au piano.

L'expertise permet l'automatisation de certaines tâches qui, à force de répétition, font partie intégrante de la personne. Cet automatisme peut être retrouvé chez les musiciens experts en improvisation. Dans une étude en IRMf par Limb & Braun (2008) réalisée sur des musiciens en Jazz, les auteurs découvrirent de forts motifs de baisse d'activité dans le cortex préfrontal, le haut-lieu de la programmation et du contrôle chez l'être humain, associés avec des augmentations d'activité dans les aires sensori-motrices nécessaires à l'exécution de la performance musicale (Limb & Braun, 2008). Ce résultat singulier suggérerait que toutes les pensées conscientes doivent être inhibées pour réussir à improviser, ce que corroborent les rapports subjectifs des artistes définissant l'improvisation comme reposant sur des processus sous-jacents en dehors du contrôle de la conscience. Ce niveau de maîtrise "inconscient" des professionnels démontre un surapprentissage de la technique musicale caractéristique d'un grand niveau de maîtrise. Comme me l'a souvent répété ma tante, "lorsque tu auras oublié comment et quand tu as appris une chose, c'est que tu la connaîtras parfaitement".

Dans une étude en EEG par Musacchia (2007), les auteurs ont présenté des stimuli audio, audiovisuels musicaux et linguistiques à des musiciens. Les participants ont démontré une réponse évoquée au niveau du tronc cérébral plus tôt et plus fort que les non-musiciens pour les deux catégories de stimuli dans les deux modalités de présentation. De plus, il a été mis en évidence un verrouillage de phase de cette réponse avec la périodicité des stimuli, fortement corrélé avec la longueur de la pratique musicale des musiciens. Une autre expérience par Chen (2008) montra que la production de rythmes chez les musiciens entraînait une augmentation de l'activation dans le cortex préfrontal dorso-latéral droit et le gyrus frontal inférieur droit, des régions utiles dans la mémoire de travail de la musique (Chen et al., 2008).

Pour terminer, une étude compara la performance de musiciens d'orchestre dans une tâche de rotation 3D mentale, soit d'aptitude visuo-spatiale, par rapport à des experts dans le domaine. Le but était de déterminer si l'expertise musicale était transférable à d'autres compétences cognitives (Sluming, 2007). Les résultats comportementaux montrèrent que les musiciens étaient capables de réaliser des performances égales aux experts en temps et réponses correctes, et meilleures par rapports au profil typique de la personne moyenne. D'un point de vue anatomique, les artistes démontrèrent de plus grandes activations par rapport au groupe contrôle dans l'aire de Broca (BA 44/45), une aire utilisée dans le déchiffrage de partition.

### III. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons insisté sur l'importance de la validité écologique des expériences car nous pensons que c'est un élément clé lors de l'étude des interactions humaines. Basé sur ces prémisses, nous avons conclu que la performance musicale est un paradigme expérimental adéquat pour les études en hyperscanning. En effet, la musique nécessite de fines capacités cognitives, et n'est possible que grâce à une coopération continue avec des partenaires et est intimement liée aux émotions. Nous avons également discuté de la pertinence des études longitudinales pour étudier les phénomènes de synchronisation inter-cérébraux et de pouvoir caractériser leur évolution au cours du temps. À notre connaissance, aucune étude en hyperscanning n'a employé de design longitudinal. Cela pourrait permettre à la communauté de comprendre comment les réseaux cérébraux s'organisent et changent alors que la relation entre les participants se construit.

Nos arguments reposent sur un socle composé de plusieurs études théoriques et expérimentales récentes qui ont employé avec succès la performance musicale (Babiloni et al., 2012; D'Ausilio et al., 2015; Hunt, 2015; Lindenberger et al., 2009; Müller et al., 2013; Overy & Molnar-Szakacs, 2009). Il est possible de faire la remarque qu'une performance musicale exige des compétences hautement spécialisées, invalidant la généralisation à la population générale. En effet, une étude a montré que certaines structures du cerveau des musiciens diffèrent significativement de ceux des non-musiciens, en particulier dans les régions motrices, auditives et visuo-spatiales, dû, au moins en partie, à des adaptations structurelles lors de l'acquisition de compétences musicales (Gaser & Schlaug, 2003). Cependant, la plupart des êtres humains partagent des capacités musicales implicites et possèdent donc des compétences de base qui sont comparables aux musiciens lors de l'écoute d'une performance musicale (Koelsch et al., 2000). Ainsi les découvertes futures sur l'interaction sociale entre les musiciens peuvent s'étendre au reste de la population et ne sont pas spécifiques aux musiciens. Un papier récent par Dumas et al. (2014) a présenté la musique ainsi que la danse comme des activités fournissant simultanément des situations écologiques alliant la première (subjective: les sentiments, les émotions) et troisième perspective sociale (objective: mesures physiologiques). Ce point de vue supporte nos revendications sur la performance musicale, en renforçant la notion que les chercheurs devraient prendre plus en compte l'expérience subjective de chaque participant dans la relation sociale (Dumas et al., 2014). Il existe bien sûr tout un panel d'autres activités écologiques partageant le même engagement émotionnel que la performance de la musique, ce qui les rend intéressants à étudier (i.e., la danse, le chant, le sport). Par exemple, Müller et Lindenberger (2011) ont observé un couplage oscillatoire de l'activité respiratoire et

cardiaque entre le chef de cœur et les chanteurs d'une chorale. L'expérience menée par Bachrach et al. (2015) a étudié la coordination public-danseurs lors d'un spectacle de danse contemporaine sur plusieurs paramètres : physiologique (respiration), cognitif (perception du temps) et le niveau d'engagement dans la tâche. Les auteurs ont constaté que le degré de synchronisation entre l'observateur et les danseurs a été associé au niveau d'attention que le spectateur portait sur la respiration. Cette étude pilote démontre la faisabilité d'enregistrement des réponses physiologiques de danseurs en activité qui pourrait être mise à profit en hyperscanning (Bachrach et al., 2015). Cependant, la danse, le chant et le sport (e.g., l'aviron) devraient engendrer plus de mouvements et d'artéfacts musculaires lors d'enregistrements en EEG. Comme l'a suggéré Dumas et al. (2014), les futures modalités de neuroimagerie et protocoles expérimentaux pourraient répondre à certains de ces problèmes. L'EEG excelle dans l'enregistrement des rythmes cérébraux et permet de voir leurs changements très rapides, cependant, il ne permet pas de voir la dynamique plus lente que l'on peut trouver lors d'interactions sociales au tour-par-tour. En outre, l'EEG ne possède pas une bonne résolution spatiale, ce qui est d'une importance primordiale pour identifier avec précision les structures cérébrales impliquées dans l'activité à l'étude. Koike et al. (2015) argumentèrent qu'une exploration multi-modale en neuro-imagerie pourrait aider à améliorer la résolution spatiale et temporelle. Ils proposèrent l'utilisation de l'EEG et de l'IRMf en hyperscanning pour répondre à cette demande. Cependant, comme nous l'avons souligné plus tôt, un environnement écologique est crucial lors de la conduite d'expériences sur l'interaction sociale et l'IRMf n'offre pas des conditions satisfaisantes. Une option plus appropriée pourrait être l'utilisation de l'EEG et de la fNIRS conjointe (imagerie spectroscopique proche infrarouge fonctionnelle). En effet, les caractéristiques de résolution spatiale et temporelle de la fNIRS sont intermédiaires entre celles de l'IRMf et de l'EEG. De plus, la fNIRS permet la même validité écologique que l'EEG (Cui et al, 2011; Koike et al, 2015). En outre, la fNIRS est plus appropriée que l'EEG pour mettre en valeur les dynamiques lentes qui entrent en jeu dans les interactions au tour-par-tour.

Pour certains, elle peut représenter un moyen de se réveiller tranquillement le matin, pour d'autres, il s'agit d'un fond sonore pour travailler, et pour d'autres encore, une pratique professionnelle pour gagner leur vie. Quelle qu'en soit notre utilisation ou notre représentation, la musique nous lie en tant qu'individu à nos semblables sur le plan physique, émotionnel, intellectuel et spirituel. Il arrive aussi parfois que notre mélodie se mêle à celle d'une personne en particulier, battant au même tempo, *amoroso*. Jouée tantôt *fortissimo* et d'autres fois *spianato*, notre musique oscille entre envolée lyrique, silence abyssal et refrain insaisissable.

*“ A mes yeux, l'art est une réponse étrange et puissante à la question : qu'est-ce qu'être en vie.”*

*La Horde du Contrevent –Alain Damasio*

## **Chapitre III. Méthodes d'analyse des données d'Hyperscanning en EEG**



# Méthodes d'analyse des données d'Hyperscanning en EEG

---

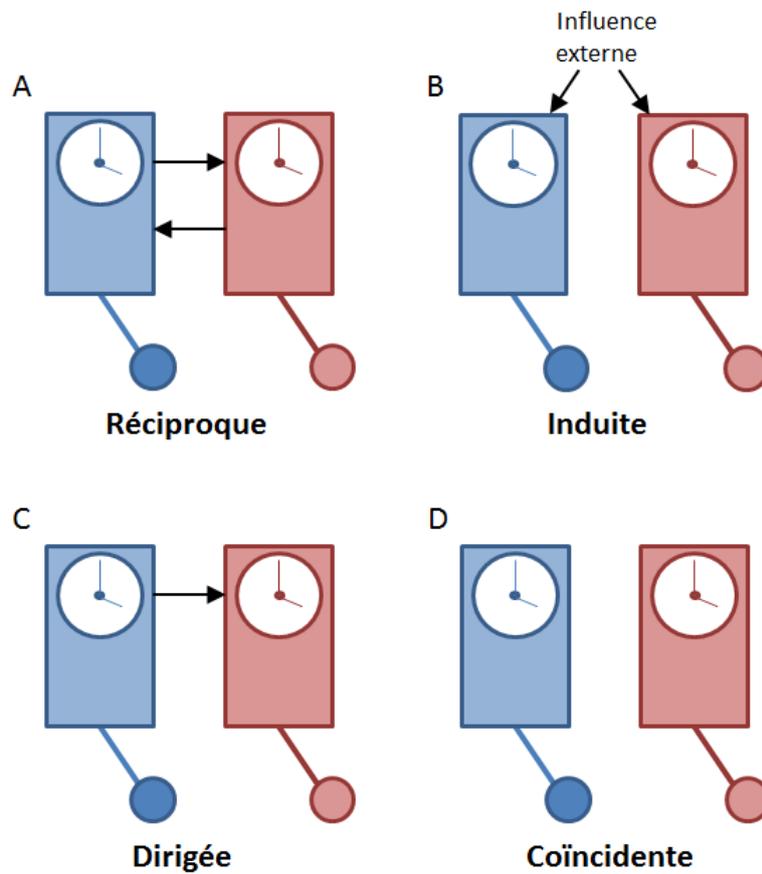
## I. Introduction : la notion de synchronie

L'activité cérébrale et le couplage neuronal lors d'interactions sociales sont des phénomènes de plus en plus explorés dans le domaine des neurosciences sociales (Dumas, 2011; Hari & Kujala, 2009; Konvalinka & Roepstorff, 2012; Schilbach et al., 2012). Parmi les exemples des tâches demandant une coordination fine en temps réel on trouve la production musicale, le chant, la danse, les sports collectifs ainsi que les activités renforçant le lien social tel que la conversation ou le baiser romantique. La littérature apporte des preuves scientifiques que de tels comportements sont accompagnés de synchronisations cérébrales ainsi que du couplage d'autres fonctions biologiques telles que la respiration et l'activité cardiaque (Bachrach et al., 2015; Blood & Zatorre, 2001; Müller & Lindenberger, 2011, 2014; Müller et al., 2013; Stephens et al., 2010). Pour caractériser ces phénomènes, de nombreuses méthodes d'analyse ont été développées et utilisées dans la littérature en hyperscanning (Baccalá & Sameshima, 2001; Bullmore & Sporns, 2009; Pascual-Marqui, 2007; Sänger et al., 2013). Cependant ces méthodes ne peuvent être utilisées indifféremment et de façon interchangeable à chaque jeu de données récolté en expérimentation. Aussi, la technique d'analyse employée dépend de plusieurs paramètres à déterminer lors du design de l'expérience : le type de relation que l'on veut explorer entre les deux systèmes (symétrique ou causal, linéaire ou non), du domaine d'intérêt de l'analyse (temporel ou spectral), du niveau d'analyse (bivarié ou multivarié), ainsi que la modalité d'imagerie cérébrale (propriétés statistiques des signaux).

Chaque mesure développée dans la littérature est adaptée à un aspect de la synchronisation, et nous allons utiliser l'exemple des pendules de Christiaan Huygens pour illustrer les différents aspects de synchronisation (**Figure 3.1**). En 1665, Huygens a écrit une lettre à la Société Royale de Londres décrivant un comportement de synchronisation étrange entre des pendules d'horloges identiques accrochées sur un même support. En effet, il observa qu'au bout d'un certain temps les deux pendules avaient tendance à se balancer en anti-phase parfaite, et ce quelle qu'ait été la phase initiale lors de la mise en marche des horloges. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que les mouvements de pendule de l'une des horloges provoquaient des petites vibrations dans le support

commun, et que ces mouvements altéraient progressivement les oscillations du second pendule. Réciproquement, les vibrations de la seconde horloge faisaient aussi vibrer le support ce qui se répercutait sur l'oscillation du premier pendule. Ces petites impulsions mutuelles continuèrent d'altérer la phase de chaque pendule jusqu'à un point d'équilibre où la vibration de l'un contrebalançait parfaitement la vibration de l'autre. Cet état d'équilibre se trouvait être le moment précis où les pendules étaient en anti-phase. Les deux horloges étaient dans un système de feedback négatif réciproque et continuèrent de changer leurs états jusqu'à ce que le système ait atteint un état de transfert minimum d'énergie (vibrations) entre elles. Celui-ci était atteint dans la condition d'oscillation en anti-phase. Il existe aussi deux autres paramètres importants à prendre en compte dans la synchronisation : la fréquence d'oscillation que l'on pourrait comparer au rythme auquel le pendule oscille de gauche à droite (une horloge peut osciller deux fois plus vite qu'une autre, mais rester dans la même phase) ; et l'amplitude qui serait la longueur du pendule (le pendule d'une horloge franc-comtoise est beaucoup plus grand que celui d'une horloge à coucou, mais il peut osciller à la même fréquence). Dans la littérature en hyperscanning plusieurs études ont pu mettre en évidence un tel état de synchronisation réciproque entre deux personnes aux mêmes fréquences (Dumas et al., 2010; Müller et al., 2013; Sängler et al., 2013), que ce soit en phase ou en anti-phase. Cependant, la notion de synchronisation est complexe. Elle peut être mesurée de diverses manières en fonction des hypothèses que l'on a sur ses origines.

Premièrement, il est possible que la relation soit réciproque comme dans les horloges (**Figure 3.1.a**). Auquel cas des mesures de synchronie comme la cohérence (Bendat & Piersol, 2011), la phase locking value (PLV) (Lachaux et al., 1999), ou la Canonical Correlation Analysis (CCA) (Hotelling, 1936), peuvent être utilisées. Mais il est possible qu'un troisième facteur influence les personnes de la même manière (**Figure 3.1.b**), comme par exemple dans le cas de l'observation d'un film (Hasson et al., 2008; Hasson et al., 2004; Nummenmaa et al., 2012). Un autre cas de figure est que l'influence soit principalement unidirectionnelle et non réciproque (**Figure 3.1.c**) (Konvalinka et al., 2014), et donc, des mesures dirigées comme la causalité de Granger (Granger, 1969), la Partial Directed Coherence (PDC) (Baccalá & Sameshima, 2001), ou l'Integrative Coupling Index (ICI) (Müller et al., 2013; Sängler et al., 2013), sont appropriées à cette situation. Enfin, il existe une dernière situation qui est extrêmement improbable mais possible. Il s'agit d'une "relation" de coïncidence où l'on peut mesurer une synchronisation qui est fortuite alors qu'il n'existe pas de couplage à proprement parler entre les deux systèmes : la variation synchronisée entre deux variables n'implique pas toujours l'existence d'un couplage des systèmes (**Figure 3.1.d**). Une véritable synchronisation serait celle qui résulterait de l'ajustement réciproque des rythmes des systèmes de par leur interaction.



**Figure 3.1 Types de synchronisation.**

A) Le premier cas montre une synchronisation réciproque comme dans le cas des horloges de Huygens. Dans ce schéma, les horloges se synchronisent en phase de par l'influence réciproque de leurs mouvements. B) Dans le second cas, la synchronisation est induite par un troisième facteur commun régulant l'oscillation des pendules. C) Dans la troisième situation, les deux pendules sont synchronisées de par l'unique influence d'une horloge sur l'autre. D) Enfin, le dernier cas représente une synchronisation fortuite des deux horloges. Aucun des deux pendules n'a d'influence sur l'autre, il se trouve qu'ils oscillent à la même fréquence par coïncidence.

Dans la section suivante, nous allons dans un premier temps introduire l'électroencéphalographie en tant que modalité de neuroimagerie, avec ses propriétés et ses limitations. Ensuite, nous ferons la description de deux mesures de connectivité qui ont été empruntées dans la littérature en hyperscanning, ainsi que leurs limites dans l'application à l'EEG. Puis, nous verrons que la séparation de source aveugle (BSS) nous permet de nous affranchir de certains désavantages de cette modalité de neuroimagerie et que son extension à de multiples jeux de données (jBSS) est un outil particulièrement adapté à l'analyse de signaux en hyperscanning. Enfin, nous terminons en discutant des nouvelles limites de ces méthodes et des stratégies possibles pour y remédier.

## II. Introduction à l'électroencéphalographie

L'électroencéphalographie (EEG) est une modalité de neuroimagerie non invasive et indolore. Elle consiste à enregistrer le potentiel électrique cérébral d'une personne en plaçant des électrodes sur son cuir chevelu. Le signal mesuré est la résultante de la sommation des potentiels post-synaptiques simultanés d'une grande population de neurones (entre 100 millions et 1 milliard) orientés dans la même direction (Nunez & Srinivasan, 2006). Cette condition géométrique (cruciale, sinon la somme des potentiels s'annulerait) est remplie par les neurones pyramidaux présents et organisés en colonnes dans le cortex humain. Ainsi, ces assemblées de neurones peuvent, lorsqu'ils sont en synchronie temporelle (sinon, une fois encore, la somme s'annulerait), être assimilées à des dipôles électriques (ou *sources cérébrales*) dont les électrodes de l'EEG enregistrent la sommation des potentiels sur une surface d'au moins environ 2cm<sup>2</sup> (Lopes da Silva, 2004). Les électrodes sont plus sensibles aux activités en surface, et l'activité neuronale profonde est beaucoup moins visible. Par ailleurs, l'EEG bénéficie d'une très haute résolution temporelle de l'ordre de la milliseconde.

L'EEG enregistre des différences de potentiels électriques qui peuvent être définies de multiples façons en fonction du choix de la référence. Soit elles peuvent être bipolaires, auquel cas on mesure les différences de potentiel entre électrodes adjacentes, ce qui est la pratique la plus courante dans le milieu médical. L'autre cas est une référence commune à toutes les électrodes et choisie comme la plus neutre possible, c'est-à-dire éloignée autant que possible des activités cérébrales ou musculaires (e.g., lobe d'une oreille ou bout du nez). Ce type d'enregistrement est préféré en recherche car une référence commune simplifie l'utilisation de transformations linéaires.

L'observation des rythmes cérébraux (bande de fréquence delta (1-4 Hz), theta (4-8 Hz), alpha (8-12 Hz), beta (12-30 Hz), gamma (>30 Hz)) mesurés grâce à l'EEG peut nous permettre d'étudier les phases de sommeil chez l'Homme (Feinberg et al., 1967) ou encore de caractériser des maladies neurologiques comme l'épilepsie (Mormann et al., 2000). Certains rythmes peuvent aussi être dépendants de l'état psychologique ou attentionnel de la personne chez qui on les enregistre (Aftanas & Golocheikine, 2001; Klimesch et al., 1998; Mann et al., 1992; Schmidt & Trainor, 2001). Ainsi, différentes caractéristiques fréquentielles peuvent être reliées à différentes fonctions. L'EEG présente certaines limitations qui peuvent compliquer l'analyse et l'interprétation des enregistrements de l'activité cérébrale :

- L'orientation des neurones dans le cerveau dépend de leur emplacement dans les circonvolutions cérébrales. Aussi, il est possible que des populations d'une même zone cérébrale soient orientées de différentes façons : (1) source radiale, c'est-à-dire

perpendiculairement à la surface du crâne, et sera plus facile à détecter à l'œil nu (topographie unimodale localisée) ; (2) source tangentielle, c'est-à-dire parallèlement à la surface du scalp et qui sera plus difficile à identifier (topographie bimodale diffuse).

- Les potentiels enregistrés par les électrodes ne sont pas nécessairement tous d'origine cérébrale, et il se peut que du bruit provenant de source physiologique (l'activité électromyographique (EMG), électro-oculographique (EOG) ou électro-cardiaque (ECG)) ou externe (secteur électrique à 50/60 Hz, interférence électromagnétiques, capteurs défectueux ou mal posée, etc.) se superposent aux signaux EEG. Le bruit peut être plus ou moins puissant et plus ou moins difficile à éliminer selon son origine.
- Les potentiels électriques des signaux cérébraux doivent se diffuser à travers plusieurs couches (tissu cérébral, liquide céphalo-rachidien, os du crâne, peau) avant de pouvoir être mesurés à la surface. Ces différents milieux sont non homogènes, car faits de différents tissus, et anisotropes, c'est-à-dire que leur résistivité n'est pas la même dans toutes les directions.
- Enfin, la conduction volumique où chaque électrode mesure la sommation simultanée des potentiels de sources provenant de différentes régions cérébrales (**Figure 3.2**), ce qui rend l'interprétation des signaux en termes neurophysiologiques difficile.



**Figure 3.2 Schéma du mélange des sources cérébrales sur les électrodes**

Les électrodes posées sur le scalp du sujet enregistrent le mélange linéaire des potentiels électriques produits par des populations de neurones (dipôles), c'est-à-dire de l'ensemble des sources corticales actives.

Il n'existe pas de d'effet d'induction magnétique à des fréquences inférieures à 1 MHz, ce qui concerne tout le spectre des rythmes cérébraux situés en général entre 1 et 40 Hz (Nunez & Srinivasan, 2006). De plus, les effets capacitifs qui tendent à retarder les signaux sont négligeables en dessous de 40Hz (Nunez & Srinivasan, 2006), ainsi tout potentiel électrique enregistré en surface sur le scalp reste en phase avec son générateur (i.e., population de neurones). Nous pouvons donc faire l'hypothèse que le mélange des sources cérébrales est linéaire et instantané, et fixe dans le temps. Nous nous retrouvons dans la situation suivante :

$$\mathbf{x}_m(t) = \mathbf{A}_m \mathbf{s}_m(t) \quad (3.1)$$

où  $\mathbf{x}_m(t) \in \mathbb{R}^N$  sont les enregistrements EEG,  $N$  le nombre d'observation (capteurs),  $\mathbf{s}_m(t) \in \mathbb{R}^P$  est le vecteur de sources inconnues, avec  $P \leq N$  le nombre de sources inconnues,  $\mathbf{A}_m \in \mathbb{R}^{N \times P}$  est la matrice de mélange inconnue, et  $M$  est le nombre de sujets, avec  $m \in \{1, \dots, M\}$ . Notons qu'il est probable que le nombre de sources cérébrales existantes soit supérieur au nombre de capteurs dont on dispose. Dans le cas d'interactions sociale, il existe plusieurs vecteurs de sources  $\mathbf{s}_{m1}$  et  $\mathbf{s}_{m2} \in \mathbb{R}^P$  sachant  $m1 \neq m2$ , dont certaines peuvent être corrélées, et d'autres qui sont non corrélées. Puisque nous nous intéressons à l'interaction, nous cherchons à trouver les sources communes entre les personnes interagissant. Ainsi, nous voulons améliorer la faible résolution spatiale de l'EEG, ainsi que retrouver les sources cérébrales corrélées de l'interaction sociale. Pour cela, si l'on se réfère au modèle 3.1, il faut retrouver les matrices de mixage  $\mathbf{A}_m$  pour chaque individu.

### III. Mesures du couplage cérébral

#### a. Cohérence et Phase Locking Value

La fonction de cohérence est une mesure linéaire et bivariée entre deux signaux. Elle détermine la dépendance dans le domaine spectral (Bendat & Piersol, 2011). Afin de la calculer, il faut en premier lieu estimer le cross-spectre qui fournit une mesure des propriétés spectrales propres et conjointes de plusieurs jeux de données. L'estimation du cross-spectre  $\mathbf{S}(\omega)$  repose sur la transformée de Fourier discrète des signaux pour chaque fréquence  $\omega$ . Pour deux séries temporelles stationnaires  $x(t)$  et  $y(t)$  contenues dans le vecteur  $\mathbf{z} = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix}$ , les cospectres propres (intra :  $s_{xx}(\omega)$ ,  $s_{yy}(\omega)$ ) et conjoints (inter:  $s_{xy}(\omega)$ ,  $s_{yx}(\omega)$ ) estimés par la méthode de Welch (Welch, 1967) s'expriment ainsi :

$$\mathbf{S}_{z(\omega)} = \begin{bmatrix} s_{xx}(\omega) & s_{xy}(\omega) \\ s_{yx}(\omega) & s_{yy}(\omega) \end{bmatrix} \quad (3.II)$$

La cohérence  $Coh_{xy}(\omega)$  s'exprime en normalisant le module des cross-spectres de deux séries temporelles  $x(t)$  et  $y(t)$  par la densité spectrale de chacune :

$$Coh_{xy}(\omega) = \frac{|s_{xy}(\omega)|}{\sqrt{s_{xx}(\omega)s_{yy}(\omega)}}, \quad (3.III)$$

où  $|\cdot|$  est le module sur  $\mathbb{C}$ . Ainsi, la cohérence  $Coh_{xy}(\omega)$  mesure la fraction de variance d'un signal  $x$  à la fréquence  $\omega$  qui peut être expliquée par une transformation linéaire constante des coefficients de Fourier obtenus pour un signal  $y$ . Elle donne des valeurs entre 0 et 1, où 0 correspond à l'absence de cohérence, et 1 à la cohérence totale entre  $x$  et  $y$  à la fréquence  $\omega$ . Notons que Pascual-Marqui (2007) développa une extension de la cohérence au cas multivarié et non-linéaire.

Les mesures de synchronie de phase connaissent un certain succès depuis leur introduction en neuroscience par Lachaux et collaborateurs (1999). De telles méthodes consistent à calculer la phase instantanée à partir d'une représentation temps-fréquence  $(t, \omega)$ . Néanmoins, il est possible d'utiliser cette mesure dans le domaine fréquentiel  $(\omega)$  uniquement. Ainsi, l'indice de synchronie de phase (Phase-Locking Value, *PLV*) s'obtient en normalisant les coefficients spectraux de manière à ce que le module soit unitaire, c'est-à-dire en éliminant toute information sur l'amplitude et ensuite en utilisant la formule 3.II. Notons que la *PLV* n'est pas linéaire contrairement à la cohérence (Lachaux et al., 1999). De nombreuses approches et variations ont été proposées afin d'étendre l'estimation de la synchronie de phase à des signaux multivariés, ou encore pour prendre en compte la non-stationnarité dans les domaines temporels et/ou fréquentiels (e.g., : Omidvarnia et al., (2013); Rosenblum et al., (2002); Rudrauf et al., (2006)).

## b. Limites

Il existe plusieurs limitations dans les analyses des données en EEG et plus spécifiquement en hyperscanning dont l'origine est théorique, méthodologique ou physique. Dans cette section, nous allons parler des problèmes à l'interprétation des mesures de couplage lorsque l'on analyse des données récoltées en EEG-hyperscanning. Nous nous focalisons ici sur les mesures de synchronie de phase et de cohérence car il s'agit là des plus utilisées actuellement dans la littérature.

Le cœur du problème est la complexité de notre cerveau. Sa structure présente une interconnexion massive et son activité électrique et hormonale est hautement dynamique, non-

stationnaire et non-linéaire (Hilgetag & Hütt, 2014; Rabinovich et al., 2012). Ainsi, notre cerveau est semblable aux mouvements des vagues sur la plage : une somme d'activités rythmiques ou transitoires en fonction d'événements spontanés ou évoqués, dont les différentes phases s'entremêlent, présentant des motifs qui se créent et se défont au cours du temps en différents espaces (Buzsáki & Draguhn, 2004; Kelso, 2012). Ces moments fugaces sont reflétés par des instants plus ou moins longs de couplage entre des populations de neurones dont l'origine anatomique peut être proche ou éloignée, et sont par définition fragiles et complexes (Friston, 2000).

Le fait que l'activité du cerveau n'est pas un processus stationnaire nous oblige à travailler sur des périodes d'intégrations réduites de manière à couvrir un large panel de périodes de couplage. La résolution temporelle de l'EEG rend possible l'enregistrement des rythmes très rapides (e.g., rythmes gamma) de l'ordre de dizaines de millisecondes, et donc met à notre disposition la possibilité de finement discriminer de nombreux motifs de synchronisation d'un point de vue temporel. Le problème survient lors de l'utilisation des indices de synchronisation du domaine spectral. La plupart font l'hypothèse que le couplage est localement stationnaire. Cela présente le risque de rater des phénomènes de couplage dépendant spécifiquement d'une dynamique de variation fréquentielle dans le temps (Rudrauf et al., 2006).

L'interaction des relations linéaires et non-linéaires entre populations de neurones dans le cerveau peut être synchrone autour d'une même fréquence, ou alors asynchrone (interaction inter-fréquence) (Friston, 2000). Ce phénomène possède une réalité physiologique qui serait présente dans plusieurs régions du cerveau (Jensen & Colgin, 2007) et peut être difficile à révéler en hyperscanning. Néanmoins, Müller & Lindenberger (2014) ont pu mettre en évidence que certaines bandes de fréquences (e.g., alpha) peuvent réguler le rythme des autres fréquences, ce qui est pertinent avec la littérature (Osipova et al., 2008; Schack et al., 2005). La plupart des indices de couplage utilisés dans la littérature évaluent uniquement des formes simples de synchronisation sur la même bande de fréquence. Cependant, le développement de nouvelles méthodes d'estimation d'un tel couplage est un champ en développement (Tort et al., 2009) qui a par exemple donné issue à une technique appelée analyse bispectrale permettant de quantifier les interactions entre différentes oscillations cérébrales (Jirsa & Müller, 2013).

Les mesures d'interconnectivité entre les cerveaux des participants représentent des propriétés statistiques et mathématiques et n'expriment en aucun cas l'acheminement d'une quantité physique d'information du cerveau d'un individu vers celui d'un autre (Astolfi et al., 2010). Elles ne rendent pas entièrement compte de l'ensemble des mécanismes en jeu, et peuvent ne refléter qu'un mélange de nombreux effets. Par ailleurs, la relation entre ces mesures et les flux d'informations réelles d'un cerveau est encore à ce jour débattue (Stephan et al., 2008). Ainsi,

l'équivalence de ces indices avec les activités des populations de neurones à la suite d'une activité expérimentale doit être interprétée avec prudence (Friston, 2011; Horwitz, 2003), d'autant plus si l'on se met dans le cas de l'hyperscanning (Burgess, 2013). Pour pallier à ces problèmes, il est nécessaire de choisir une modalité de neuroimagerie ainsi qu'un paradigme expérimental approprié pour le type de relation que l'on souhaite explorer (i.e., la Partial Directed Coherence (PDC) pour une relation de leader-follower car elle est dirigée et que l'interaction est asymétrique). L'objectif est d'utiliser des méthodes d'analyse qui ont un sens par rapport à la situation investiguée et donc se rapprocher le plus possible de la réalité. De plus, il est nécessaire d'avoir des hypothèses bien définies et claires vis-à-vis de la méthode employée, car elles peuvent nous permettre de cibler et d'interpréter plus précisément les données selon la situation expérimentale et la modalité employées.

Il est possible d'analyser les données avec différentes mesures de couplage. La catégorie bivariée de certaines de ces mesures peut poser un certain nombre de problèmes computationnels et statistiques étant donné qu'elles ne peuvent être estimées qu'entre paires de signaux uniquement. Si l'on veut tester toutes les combinaisons possibles de capteurs, la dimensionnalité ( $d = n(n-1)/2$ ) explose rapidement (e.g., avec 64 électrodes  $d = 2016$ ) ce qui peut être coûteux en ressources. Une autre conséquence est la réduction de la puissance statistique pour trouver les synchronies significatives du fait du nombre élevé de comparaison multiples à faire. Pour contourner ce problème et réduire le nombre de dimensions, la plupart des chercheurs regroupent des électrodes en cluster par régions d'intérêt (Astolfi et al., 2010b; Dumas et al., 2010; Müller et al., 2013). Cette manipulation a cependant un revers, car elle nous oblige à formuler des hypothèses quant aux zones susceptibles de présenter un couplage. Ces problèmes ne s'appliquent pas dans le cas des mesures multivariées, cependant elles ne nous permettent pas de caractériser la connectivité et la dynamique locale des structures neuronales sous-jacentes.

Les activités électriques des sources cérébrales se diffusent à travers les différentes couches du cortex et se superposent en surface par conduction volumique, ce qui a deux effets majeurs sur l'interprétation des motifs de synchronisation enregistrés à la surface (Tognoli & Kelso, 2009). Tout d'abord, la propagation électrique d'une même source peut être relevée par de multiples électrodes ce qui entraîne une synchronie de phase instantanée entre électrodes proches, et une synchronie en opposition de phase entre électrodes localisées à chaque pôle de la source (Pascual-Marqui, 2007). Les variations de la cohérence mesurée en surface peuvent être interprétées comme des phénomènes de coordination globale par erreur, alors qu'il ne s'agit que de variation de l'activité d'une seule source. Ensuite, l'addition des potentiels électriques issus de l'activité de l'ensemble des sources du cerveau peut causer de sérieux problèmes d'interférence, surtout si les sources sont

rapprochées, et peuvent fausser nos mesures de synchronie de phase. Ces phénomènes de diffusion volumiques sont particulièrement problématiques pour déterminer les synchronisations cérébrales au sein d'une même personne (intra-sujet). Cependant, ces désavantages n'existent pas pour le cas inter-sujet car une source cérébrale d'un sujet ne peut pas se diffuser de son cerveau à celui de son partenaire. Ainsi, l'étude du couplage inter-cérébral reste in affectée par ce problème physique.

Ces obstacles à l'interprétation du couplage cérébral en EEG nous démontrent que s'efforcer de travailler directement dans l'espace des électrodes peut-être périlleux. En effet, les problèmes théoriques, méthodologiques et physiques nous forcent à changer de perspective. Ainsi, comme nous l'avons suggéré au début de ce chapitre, il existe une solution qui consisterait à retrouver les sources même des signaux récoltés à la surface du scalp afin de s'affranchir de tous les obstacles cités ci-dessus. Cette manipulation est possible et peut être réalisée grâce à des méthodes de séparation aveugle et conjointe de sources que nous verrons dans la section qui suit.

## **IV. La jBSS en hyperscanning**

### **a. La séparation de source aveugle et conjointe**

La BSS a été appliquée la première fois à des signaux EEG par Makeig et al.(1996) et s'est depuis révélée comme un outil puissant et efficace pour l'analyse et l'interprétation des signaux cérébraux, facilitant par exemple la détection et le rejet d'artefact (Makeig et al., 2004; Onton et al., 2006). D'un point de vue pratique, la BSS sépare les mélanges enregistrés au niveau des électrodes posées sur le scalp en composantes indépendantes, ce qui permet de se rapprocher au maximum de la forme des sources contribuant à l'activité électrique enregistrée par l'EEG. Elle permet la projection de chaque source estimée sur le canevas du scalp afin d'observer leur contribution respective sur chaque capteur, mais plus encore de retrouver leur localisation dans le cerveau. Ces algorithmes répondent à des limitations majeures de l'EEG (faible rapport signal / bruit du aux parasites et la faible résolution spatiale engendrés par les effets de conduction volumique et de mélange de potentiels au niveau des électrodes). Combiner cette méthode avec la portabilité et les propriétés écologiques de cette modalité d'imagerie en fait une combinaison puissante pour l'étude précise des processus neuronaux sous-jacents de l'interaction sociale. Cependant, il nous reste encore à examiner les prérequis en ce qui concerne l'application de la BSS aux signaux EEG.

- Premièrement, les méthodes de BSS linéaires supposent que le mélange doit être instantané, c'est-à-dire que les observations du mélange se font sur des sources qui ne sont pas décalées

temporellement. La mesure des champs électriques des sources à travers les tissus cérébraux se fait très rapidement car les délais de propagation jusqu'aux capteurs sont très courts. De plus, le principe de superposition stipule que chaque signal issu de chaque source se mélangera de façon linéaire avec les autres, ce qui est une bonne représentation dans l'EEG comme nous l'avons vu dans la section précédente (mélange linéaire et instantané).

- Deuxièmement, les sources séparées doivent être spatialement stationnaires. Dans un contexte cérébral, cela se traduirait par l'hypothèse qu'il existe une distribution d'activités cérébrales spatialement différentes pour chaque tâche, ainsi la BSS serait à même d'extraire une composante pour chacune d'entre elles. Cela a été corroboré à l'échelle macroscopique par des indices indirects récoltés en IRMf (Makeig & Onton, 2011).
- Troisièmement, les sources devraient être indépendantes entre elles. Dans un sens, cela est vérifié dans le cerveau du fait des connexions massives entre neurones au niveau local qui produisent une seule et même source identifiable. Cependant, il existe aussi des connexions entre sites neuronaux plus éloignés, et bien que ces liens soient moins nombreux, ils peuvent potentiellement jouer un rôle dans la synchronisation des différentes sources. Ces deux aspects renvoient donc à une indépendance relative des sources.
- Enfin, le dernier point est plus difficile à valider. En effet, on doit vérifier le fait que le problème de la BSS ne doit pas être sous-déterminé, c'est-à-dire qu'il doit y avoir au moins autant de capteurs qu'il existe de sources afin de trouver une solution. Il s'agit là d'un prérequis difficile à connaître étant donné la grande variabilité entre le nombre de capteurs d'un système d'acquisition, le nombre de sources cérébrales variables selon la tâche expérimentale et les individus. Il existe donc potentiellement une grande quantité de sources cérébrales dont il nous est impossible de connaître le nombre exact, et il y a un fort risque qu'elles soient plus nombreuses que le nombre de capteurs. Cela dit, dans la pratique les méthodes de BSS retrouvent en général une douzaine de composantes indépendantes dont la distribution spatiale pourrait correspondre à des vraies sources physiologiques (Delorme et al., 2012). Ce nombre de sources semble plausible au vu de la taille du système qui les génère, c'est-à-dire le cerveau.

Ainsi, sur les cinq prérequis de la BSS en EEG que nous avons énumérés, trois sont certains, un ambigu et un indéterminé. Cependant, comme indiqué dans le dernier point, en pratique, la BSS

est un succès pour retrouver et caractériser les sources à partir de signaux EEG (Chatel-Goldman, Congedo, & Phlypo, 2013). Par ailleurs, les résultats trouvés semblent en accord avec la réalité physiologique des sources cérébrales et leur projection en mélange sur la surface (Makeig & Onton, 2011).

L'estimation des sources avec la BSS est obtenue en inversant l'équation **3.I** ce qui donne :

$$\mathbf{y}_m(t) = \mathbf{B}_m^T \mathbf{x}_m(t) \tag{3.IV}$$

où  $\mathbf{B}_m \in \mathbb{R}^{N \times P}$  est appelée matrice de séparation ou de démixage, que nous devons estimer afin de retrouver les sources d'un EEG pour le sujet  $m$ . Il existe deux familles de méthodes de BSS basées soit sur les statistiques de second ordre (SOS) ou d'ordre supérieur (HOS). La question fondamentale est de savoir quel type de statistiques utilisées en BSS correspond aux données issues de l'EEG. Congedo et collègues (2008) étudièrent les indices statistiques et neurophysiologiques à prendre en compte lors du choix entre des méthodes utilisant des SOS ou des HOS dans le contexte de l'EEG. Ils affirment que plusieurs phénomènes en EEG sont fortement colorés et que, puisqu'ils sont épisodiques ou qu'ils apparaissent en courts bursts, leur énergie au cours du temps n'est jamais constante (Lopes da Silva, 2005; Buzsaki, 2006; Niedermeyer, 2005 a,b,c; Steriade, 2005) :

- Des artefacts comme les clignements d'yeux ou des contractions des muscles faciaux
- Des phénomènes épisodiques spontanés comme des fuseaux de sommeil (7-14 Hz) (Niedermeyer, 2005b; Steriade, 2005), ou des oscillations frontales sur la bande de fréquence theta (4-7 Hz) ou beta (13-35 Hz) (Niedermeyer, 2005a)
- Des phénomènes continus spontanés comme des oscillations lentes delta (1-2 Hz) retrouvées durant les phases de sommeil III et IV (Niedermeyer, 2005 b), le rythme rolandique Mu (10 à 20 Hz), et les rythmes alpha dominant dans le cortex occipital (8-12 Hz) (Niedermeyer, 2005a)
- L'activité EEG induite comme en ERD/ERS (Event-Related Desynchronization / Synchronization) (Steriade, 2005)
- L'activité EEG évoquée comme en ERP (Event-Related Potential) (Lopes da Silva, 2005)

Suite à ces considérations, ils en conclurent que les SOS étaient les plus appropriées pour capturer l'ensemble des informations pertinentes dans la plupart des phénomènes observables en EEG. En effet, ces statistiques sont à même de modéliser de telles signatures spectro-temporelles avec une telle coloration et des variations d'énergie dans le temps. D'autre part, les HOS seraient plus adaptées pour étudier les activités transitoires avec des changements de potentiels abrupts

comme les pics et les ondes complexes dans l'épilepsie (Niedermeyer, 2005c) ou les ondes vertex dans le sommeil (Niedermeyer, 2005b).

Les méthodes de BSS sont issues d'un cadre plus général des méthodes d'optimisation et d'estimation qui partagent les trois caractéristiques suivants (Comon & Jutten, 2010) : un modèle paramétrique qui décrit les propriétés d'un système (i.e., un mélange linéaire instantané), permettant d'offrir une représentation simplifiée de nos données (i.e., les sources) et de les restreindre à un cadre particulier. Un critère qui est une mesure de la qualité de notre estimation et sur lequel on va vouloir tendre (i.e., l'indépendance statistique des SOS ou HOS). Et enfin, un algorithme d'optimisation qui a pour but de maximiser ou minimiser le critère choisi au sein de l'espace de notre modèle ; il va donc converger vers une solution selon les deux dimensions définies au préalable. Dans le cas des matrices de covariance ou cospectrales (SOS), cela revient à diagonaliser conjointement les statistiques de nos observations. En effet, notre critère est de vouloir trouver des sources linéairement indépendantes, ce qui revient à minimiser leurs statistiques conjointes, c'est-à-dire l'intercorrélacion des éléments hors diagonale. Ainsi, pour un set de matrices cospectrales  $\mathbf{C}_k \in \{\mathbf{C}_1, \dots, \mathbf{C}_K\}$ , on en revient donc à trouver une matrice de séparation  $\mathbf{B}$  afin que les produits matriciels  $\mathbf{B}^T \mathbf{C}_k \mathbf{B}$  soient aussi diagonaux que possible pour toutes les  $k \in \{1, \dots, K\}$  fréquences différentes afin de s'assurer de leur non corrélation.

Etendre les méthodes de BSS à l'analyse conjointe de données en EEG récoltés simultanément sur plusieurs sujets (au moins deux) peut paraître compliqué alors qu'il serait plus aisé de prendre chaque jeu de donnée ( $M$ ) à part et d'opérer à une BSS sur leur observations ( $K$ ) séparément. Cependant, des phénomènes de couplage cérébral entre individu, décrit dans le chapitre 1 de la littérature en hyperscanning, semblent indiquer l'existence d'un lien spécifique non trivial entre les cerveaux des participants. Si l'on se rapporte au cadre de travail de la BSS, cela introduirait donc un autre a priori sur nos données. En effet, chaque jeu de données d'un participant (les signaux EEG) pourrait être corrélé avec celui de leur partenaire. Cette injection de nouvelles informations réduit donc les solutions possibles, permettant l'amélioration de l'efficacité des algorithmes de BSS (séparation de source semi-aveugle : Comon & Jutten, 2010) et de réduire énormément le risque que le problème soit sous-déterminé, étant donné qu'il doit y exister un nombre plus faible de sources cérébrales corrélées, ce qui est un avantage considérable. Prendre en compte l'information conjointe, le couplage neuronal inter-cérébral, dans la BSS, nous mène donc à l'élaboration d'un outil adapté aux données en hyperscanning qui modéliserait encore mieux la réalité physiologique: la séparation de sources aveugle conjointe (jBSS).

L'objectif de cette méthode est de séparer conjointement les sources de différents jeux de données récoltés simultanément en tenant compte des statistiques inter-sujets en plus des

statistiques intra-sujet. Prenons  $M$  sujets et soit  $\mathbf{x}_m(t)$ ,  $m \in \{1, \dots, M\}$  leurs signaux observés pour chacun d'entre eux. Le but est de chercher  $M$  matrices de démixage  $\mathbf{B}_m^T$ ,  $m \in \{1, \dots, M\}$ , (dans le cas de deux sujets  $m \in \{1, 2\}$ ), afin d'estimer les sources  $\mathbf{s}_m(t)$ ,  $m \in \{1, \dots, M\}$ . De manière à prendre en compte les statistiques intra- et inter- simultanément, nous devons calculer les matrices de covariances, ou cospectrales après transformation dans le domaine fréquentiel,  $\mathbf{C}_k^{(m_1, m_2)}$ , contenant les statistiques intra pour  $m_1 = m_2$  et les statistiques inter pour  $m_1 \neq m_2$ . Pour procéder à l'estimation des sources au sein de chaque sujet, il est nécessaire de diagonaliser toutes les matrices  $\mathbf{B}_{m_1}^T \mathbf{C}_k^{(m_1, m_2)} \mathbf{B}_{m_2}$ ,  $k \in \{1, \dots, M\}$ , en minimisant la fonction de coût (Congedo et al., 2012) :

$$\psi^{off}(\mathbf{B}) = \sum_{m_1, m_2=1}^M \sum_{k=1}^K \left\| \text{off}(\mathbf{B}_{m_1}^T \mathbf{C}_k^{(m_1, m_2)} \mathbf{B}_{m_2}) \right\|_F^2 \quad (3.V)$$

où  $\text{off}()$  remplace les éléments diagonaux d'une matrice carrée par des 0. Le problème précédent (3.V) peut être décomposé en décomposant la fonction  $\psi^{off}(\mathbf{B})$  pour chaque  $m \in \{1, \dots, M\}$ . Par exemple dans le cas  $M = 2$ , on a pour  $m = m_1$  (Congedo et al., 2012) :

$$\psi_{\mathbf{B}_{m_1}}^{off} = w_{intra} \sum_{k=1}^K \left\| \text{off}(\mathbf{B}_{m_1}^T \mathbf{C}_k^{(m_1, m_1)} \mathbf{B}_{m_1}) \right\|_F^2 + w_{inter} \sum_{m_2=1}^M \sum_{k=1}^K \left\| \text{off}(\mathbf{B}_{m_1}^T \mathbf{C}_k^{(m_1, m_2)} \mathbf{B}_{m_2}) \right\|_F^2 \quad (3.VI)$$

La somme située sur la gauche représente les statistiques intra-sujet et celle de droite les statistiques inter-sujet. Nous introduisons les poids  $w_{intra}$  et  $w_{inter}$  permettant de pondérer les statistiques associées en fonction de l'importance qu'on veut leur donner, sachant que  $w_{intra} + w_{inter} = 1$ . Par défaut elles sont de 0.5 et 0.5 respectivement. Dans le chapitre 4 expérimental nous utilisons une pondération de 0.2 et 0.8 afin d'accentuer les statistiques inter-. Remarquons que :

$$\psi^{off}(\mathbf{B}) = \sum_{m=1}^M \psi_{\mathbf{B}_{m_1}}^{off} \quad (3.VII)$$

Tous les termes des sommes de (3.VI) et (3.VII) étant positifs, minimiser la fonction de coût  $\psi^{off}(\mathbf{B})$  peut se faire en minimisant toutes les fonctions  $\psi_{\mathbf{B}_{m_1}}^{off}$ ,  $m \in \{1, \dots, M\}$  de façon séquentielle. Nous pourrions potentiellement estimer autant de sources qu'il y a de capteurs. Cependant opérer à une réduction de dimension au préalable peut avoir des avantages. En effet, un pré-whitening (Congedo, 2013) permet d'effectuer une première diagonalisation approchée des données, nous offrant le choix de conserver uniquement un certain nombre de composantes spatiales en fonction de leur puissance. Par la suite, nous considérons les matrices de démixage carrée de taille P.P avec le

nombre de sources ( $P$ ) inférieur ou égal au nombre de capteurs ( $N$ ). Les détails sur l'optimisation de **3.VII** peuvent être trouvés dans Congedo et al. (2012) (OJoB, NOJoB) et dans Gong et al. (2015) (JNOLAD).

## **b. Limitations**

Bien que la jBSS semble être particulièrement adaptée aux données en hyperscanning, elle comporte des limitations:

- (1) Dans la section IV.a de ce chapitre nous expliquons pourquoi nous privilégions l'utilisation des SOS pour l'application de la séparation de source. Cependant, il se peut que se baser uniquement sur la diagonalisation conjointe des matrices cospectrales soit insuffisant pour mettre en évidence les formes les plus complexes de couplage cérébral, comme les interactions inter-fréquence ou le couplage non-instantané (délai temporel variable : Stephens et al., (2010)).
- (2) La synchronisation au sein de chaque personne (statistique intra) est plus puissante que la synchronisation entre les deux participants (statistique inter). Cette dernière est donc moins détectable lors de la séparation de source. Une stratégie pour y remédier pourrait être celle que nous avons introduite en section IV.a, consistant à attribuer des pondérations différentes selon la statistique dans la fonction de coût.
- (3) Les algorithmes de jBSS que nous avons introduits supposent une dépendance de l'ensemble des sources estimées de par le fait qu'ils imposent une structure diagonale pour les statistiques intra- et inter. Pourtant, il semble plus réaliste que même dans une activité de coopération requérant la participation active de deux personnes, seul un nombre limité de sources cérébrales devraient être couplées entre elles (i.e., intégration simultanée des mêmes stimuli) par rapport à l'ensemble des traitements cérébraux (i.e., intention différente en fonction du rôle, activité motrice différente). Congedo (2013) propose une méthode séparant un nombre  $L$  de sources en se basant sur les statistiques inter- et intra-, et le reste des sources ( $N - L$ ) sur les statistiques intra- uniquement.

## V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit dans un premier temps la notion de synchronisation cérébrale et les outils pouvant la mesurer (e.g., cohérence, PLV, PDC, etc.). Nous avons par la suite introduit l'EEG en tant que modalité de neuroimagerie cérébrale avec ses avantages et inconvénients. Ensuite, nous avons détaillé deux mesures de synchronisation cérébrale (cohérence et PLV) qui ont été utilisées dans l'étude de l'interaction sociale en hyperscanning. Bien que l'EEG soit un excellent choix pour la conception d'expériences écologiques, sa faible résolution spatiale est un désavantage pour l'interprétation des résultats obtenus avec les indices de couplage cérébral. C'est pourquoi, nous avons introduit la séparation de source (BSS) comme méthode pour y pallier. De plus nous avons démontré que de tels algorithmes pouvaient présenter un avantage pour l'analyse conjointe de signaux simultanés (jBSS), et permettre de révéler des liens non-triviaux entre structures cérébrales de personnes différentes. Enfin, nous avons discuté des limites de l'utilisation de ces outils et d'éventuelles solutions pour y remédier afin de prendre en compte, dans le futur, une plus grande complexité du couplage lors d'interaction sociales.

# **Chapitre IV. Etude de la synchronisation cérébrale au cours du temps dans un contexte musical**



# Etude de la synchronisation cérébrale au cours du temps dans un contexte musical

---

## I. Introduction

L'étude de l'interaction sociale chez les êtres humains peut prendre de nombreuses formes et reste, malgré la riche littérature dans ce domaine, très complexe (Adolphs, 2003; Dumas et al., 2014; Frith & Frith, 2012; Giroladini et al., 2015; Hari & Kujala, 2009; Konvalinka & Roepstorff, 2012; Schilbach et al., 2012). En effet, chercher à mettre en évidence une synchronisation cérébrale lors d'activités requérant une certaine forme de coopération et/ou compétition peut être complexe. On se heurte aux nombreux processus sociocognitifs mis en jeu sous-tendant nos capacités à déceler les intentions des autres, communiquer avec eux, nous coordonner efficacement, le tout sous l'effet modulateur de nos émotions (Jean Decety & Lamm, 2006; Overy & Molnar-Szakacs, 2009).

Si l'on souhaite démêler et caractériser la multiplicité de ces phénomènes qui peuvent être couplés ou non selon le moment, il faut être capable de déterminer un cadre d'interaction sociale, une tâche expérimentale qui soit suffisamment structurée pour l'analyse, mais aussi suffisamment proche de la réalité afin d'encourager l'apparition authentique de ces processus. Par ailleurs, il est aussi important de déterminer quels sont les outils, autant d'imagerie cérébrale que d'analyse statistique ou de traitement du signal, les plus adaptés à la mise en évidence d'un couplage entre plusieurs structures inter-cérébrales. Aussi, les Chapitres 1, 2 et 3 de ce manuscrit ont brossé une palette d'études et de méthodes qui se sont déjà penchées sur le problème et nous apportent des éléments de réflexion pour définir ces prérequis. Une fois les résultats analysés et les zones cérébrales mises en évidence, il devient nécessaire d'interpréter les résultats, ou au moins de les mettre en relation avec la tâche employée. Dans notre cas, la section II du Chapitre 2 sur les neurosciences de la musique remplit la majeure partie de ce rôle.

Dans le présent chapitre, nous expliquerons tout d'abord pourquoi nous avons choisi ces outils et ce contexte expérimental particulier dans ce projet d'étude de l'interaction sociale, puis nous formaliserons nos objectifs. Dans une seconde partie nous décrirons l'expérience telle qu'elle a

été conçue et passée, pour ensuite enchaîner sur deux catégories de résultats : comportementaux et hyperscanning-EEG. Nous démontrerons que l'analyse couplée de ces deux catégories met en évidence une corrélation entre l'index de synchronisation cérébrale que nous avons choisi, la performance musicale (qui augmente au cours des sessions) et la composante comportementale représentant la qualité de la relation interpersonnelle. Enfin, nous discuterons de l'approche expérimentale et méthodologique dans la dernière partie, en mettant en avant l'importance de la localisation des sources se synchronisant chez les deux sujets et l'impact du facteur émotionnel dans la relation des pianistes.

## **a. Outils et contexte expérimental**

Le contexte expérimental est un enjeu fondateur pour notre étude. Nous devons trouver une activité capable de générer des comportements de coopération entre plusieurs personnes de façon authentique et non artificielle, tout en ayant une composante émotionnelle susceptible d'évoluer au cours du temps. Parmi le spectre d'activités remplissant ces conditions, la performance musicale est la plus prometteuse car elle permet d'étudier l'être humain dans un contexte naturel (Chapitre 1, Section III.d).

Deuxièmement, il était nécessaire de décider quel type de technologie d'imagerie cérébrale actuelle serait adapté à l'étude de l'interaction sociale en neuroscience. Par rapport aux autres modalités, la portabilité et l'absence d'encombrement de l'EEG sont des caractéristiques qui prévalent d'un point de vue écologique. De plus, la forte résolution temporelle de cet appareil est un atout majeur pour analyser le caractère dynamique et fragile du couplage cérébral résultant de l'activité expérimentale. En effet, il a été mis en avant dans la littérature que ce type de signaux pouvait être relativement fugace et momentané par rapport aux autres activités cérébrales (Dumas et al., 2014; Friston, 2000; Hari & Kujala, 2009).

Enfin, il fallait choisir des indices de couplage cérébral parmi tous ceux développés dans la littérature (Chapitre 1) et déterminer dans quel espace nous voulions calculer ces indices. Dans la majeure partie des études en hyperscanning ce calcul se faisait dans l'espace des capteurs. Néanmoins, nous considérons qu'il est par la suite très difficile d'interpréter les résultats d'un point de vue cérébral avec cette méthode. En effet, en EEG chaque électrode mesure en surface un mélange des potentiels de sources qui peuvent avoir des origines spatiales très différentes dans le cerveau. Aussi, nous avons donc décidé de conduire les analyses dans l'espace des sources pour faciliter l'interprétation future et ainsi être plus proche d'une réalité physiologique et anatomique. Afin d'y parvenir nous avons fait appel à des outils de séparation de source aveugle développés au

Gipsa-Lab, notamment à la jBSS (joint Blind Source Separation) qui est adaptée à l'analyse de signaux enregistrés simultanément en EEG (Chatel-Goldman, Congedo, & Phlypo, 2013; Congedo et al., 2012).

## **b. Définition des objectifs**

Le but de ce chapitre est de mener une investigation sur le phénomène de couplage cérébral lors de la réalisation d'une activité nécessitant une coopération, ici l'apprentissage d'une pièce de piano à quatre mains. Nous voulons évaluer la nature et la localisation des signaux cérébraux des mécanismes neurophysiologiques lors de la réalisation de la performance par les binômes de musiciens. Nous cherchons donc à observer un couplage spontané entre les différents hubs (aires cérébrales) des systèmes indépendants (cerveaux) dans le temps. En plus de cette caractérisation ponctuelle de la synchronisation inter-cerveau, nous cherchons à rajouter la composante temporelle de l'apprentissage. En effet, nous estimons que la coopération musicale et ses corrélats cérébraux seront fonction de l'apprentissage du morceau de musique en binôme ainsi que de la nature de la relation entre les musiciens. Nous résumons les objectifs de ces travaux selon les hypothèses suivantes :

- H1.** La performance musicale augmentera au cours de l'apprentissage de la pièce. Il devrait y avoir aussi un rapprochement émotionnel des pianistes entre eux qui se traduirait par une amélioration de leur relation.
  
- H2. a)** Nous nous attendons à une augmentation ou une apparition de la synchronisation au fur et à mesure des sessions. La synchronisation cérébrale devrait être significativement différente lorsque la musique est jouée en duo par rapport à lorsqu'elle est jouée avec un enregistrement simulant simplement la présence auditive du partenaire.
  
- b)** La synchronisation cérébrale devrait être significativement différente lors des périodes de qualité musicale exceptionnelle par rapport aux périodes de qualité normale.
  
- H3.** L'activation conjointe et l'activité cérébrale des participants peuvent être dépendantes de la force et du type de lien entre les deux pianistes d'un binôme. Ainsi nous pensons que la caractérisation des activations sera différente selon les groupes de pianistes et qu'elle pourra avoir une répercussion sur la qualité de la performance musicale. Il pourrait donc avoir une

corrélation entre bonne synchronisation cérébrale, la qualité de leur jeu et la qualité de la relation.

## **II. Présentation de l'expérience**

### **a. Participants et experts**

#### **i. Pianistes**

L'échantillon se compose de  $n = 10$  participants (sept femmes, trois hommes) de plus de 18 ans ( $m : 21$ ,  $\sigma : 4.24$ ) en bonne santé et tous droitiers ayant été recruté dans l'UFR de musicologie à l'Université Pierre Mendès France de Grenoble. Les critères d'exclusion démographiques sont les suivants : pathologies neurologiques, pathologies neuropsychiatriques passées ou actuelles, historique de trauma crânien avec perte de conscience, traitement médicamenteux susceptibles de moduler l'activité cérébrale, historique d'abus de drogues ou de produits dopants, femme enceinte qui allaite ou en dessous de six mois post-partum, et enfin motricité réduite passagère des membres supérieurs. De plus, il a été indiqué que la consommation d'alcool était strictement interdite le jour précédant les passations.

L'ensemble des participants pratique et s'entraîne régulièrement au piano depuis 11.4 années en moyenne ( $\sigma : 8.26$ , de 3 à 33 ans) avec un apprentissage de 8.9 ans en moyenne de piano à quatre mains ( $\sigma : 8.59$ , de 0 à 25 ans). Les cinq binômes (3 mixtes, 2 de femmes) sont réalisés en associant les pianistes selon leur niveau de pratique et d'expertise évaluées en audition par des professeurs musicologues de l'Université, selon la connaissance de l'autre ou non (connaissance mutuelle de trois mois maximum) et selon la familiarité avec les pièces de musique proposées (peu ou pas du tout).

La participation de personnes à l'expérience ainsi que le protocole expérimental ont été approuvés favorablement avant le recrutement effectif des étudiants par le Comité d'Ethique pour les Recherches Non Interventionnelles (CERNI) du Pôle Grenoble Cognition de l'Université Grenoble Alpes (2013). La totalité des participants a rempli et signé le formulaire de consentement éclairé avant le début des expériences (2013). Tous les participants ont reçu une indemnité de 11€ /heure pour 21 heures de travail estimé, soit un total de 231€.

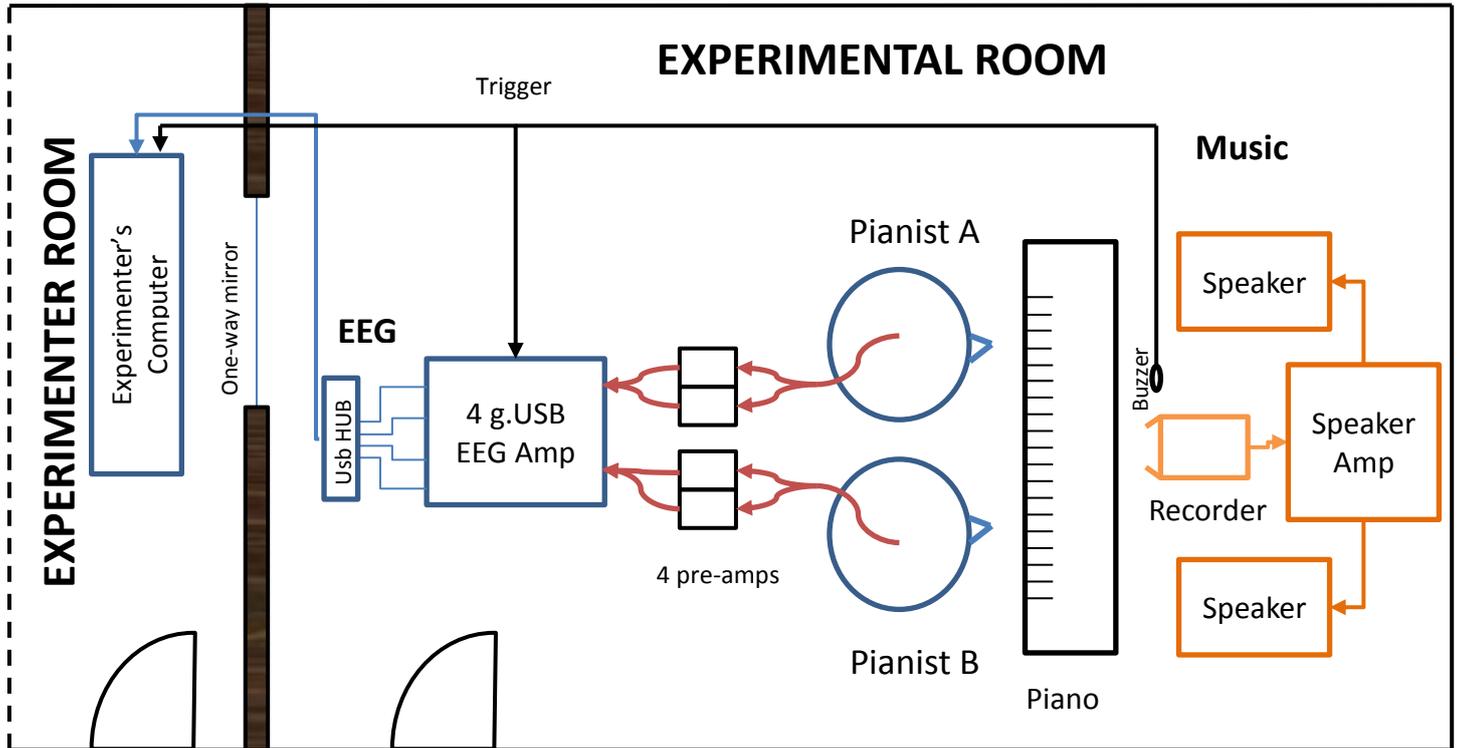
## ii. Expert

Un expert en musicologie a été recruté afin de sélectionner des œuvres de musique proposées aux pianistes selon leur niveau rapporté. Il a été aussi responsable de l'évaluation en aveugle de leur performance musicale sur leurs pièces respectives lors de l'apprentissage au cours de l'expérience grâce à des enregistrements audio de haute qualité. Nous avons appelé cette évaluation "qualité objective" de la performance musicale, notée sur une échelle de 0 à 20 à la manière du système d'évaluation en faculté de musicologie, 10 représentant la moyenne, 16 une très bonne note et 19 une note extrêmement rare. Cette mesure ne doit pas être confondue avec la "qualité subjective" de la performance musicale qui a été auto-évaluée par les pianistes eux même sur une échelle de Likert de 1 à 7. L'expert avait aussi pour tâche de définir deux périodes de haute qualité musicale d'une durée de 30 secondes maximum dans les enregistrements. Ces périodes devaient témoigner d'une coordination et d'une qualité musicale particulièrement bonne par rapport au reste de l'enregistrement. L'expert a été indemnisé à la hauteur de 14.6€ /heure pour 30 heures de travail estimés, soit un total de 438€.

## b. Matériel et méthode

### i. Instrument de musique et enregistrements

Les performances musicales ont été interprétées sur un piano numérique F120 (Roland, Nakagawa, Japon) accompagné de deux tabourets individuels pour un meilleur confort. L'acquisition audio lors des sessions d'expérience s'est réalisée grâce à un magnétophone LS-100 Multi-Track PCM Recorder (Olympus, Shinjuku, Japon) (96kHz/24bit) possédant jusqu'à 64 GB de mémoire avec une carte SD. Le retour audio quant à lui a été fait avec l'aide de deux enceintes Antigua MT32 (Cabasse, Plouzané, France) et leur amplificateur a-321 (Luxman, Yokohama, Japon) placé derrière le piano. Pour finir, la synchronisation des signaux audio et EEG de départ et de fin d'enregistrement ont pu être coordonnée grâce à un circuit imprimé Arduino (Smart Projects, Strambino, Italie) relié au port parallèle du PC d'acquisition EEG (trigger) et un à buzzer piézoélectrique fixé au magnétophone (**Figure 4.1**).



**Figure 4.1** Vue schématique du dispositif expérimental

Schéma de deux pianistes jouant ensemble. Dans la condition contrôle, le haut-parleur permettra de diffuser l'enregistrement du partenaire lors de la performance. L'expérimentateur se trouvait dans la salle adjacente pour veiller au bon déroulement de l'expérience de manière à ne pas déranger les pianistes par sa présence.

## ii. Partitions

Avec les conseils de professeurs de musicologie connaissant leurs élèves, les partitions (e.g., **Figure 4.2**) choisies par l'expert furent les suivantes par ordre de difficulté croissante :

- Maurice RAVEL, *Ma mère l'Oye* (1910), cinquième pièce '*le Jardin féérique*'
- Nino ROTA, extrait d'*Amarcord* (1973), musique du film de Federico Fellini, dans un arrangement d'Annick CHARTREUX
- Wolfgang Amadeus MOZART, *Sonate KV 358* (1774), premier mouvement (extrait)
- Jean-Louis GOBBAERTS, *Sauve qui peut* (1886), Galop op. 132
- Johannes BRAHMS, *Danse Hongroise n°5* (1869)

Chaque morceau a été choisi en fonction de sa difficulté pour convenir au niveau de chaque membre du binôme sans que chacun ne l'aient jamais joué seuls ou ensemble de manière à conserver un apprentissage lors de l'expérience. De plus, ils ont été arrangés afin d'avoir une durée de trois minutes + ou - 30 secondes.

## Hungarian Dance No. 5 in F# Minor

Primo



## Hungarian Dance No. 5 in F# Minor

Secondo



Figure 4.2 Extrait de partition de « Danse Hongroise n°5 » de Johannes Brahms pour piano à quatre mains.

### iii. Mesures comportementales

Deux questionnaires de mesure du trait d'empathie ont été dispensés aux pianistes participant à deux reprises : une fois au début de l'étude et une fois à la fin. Il s'agissait en premier lieu du questionnaire Contagion, Empathie, Coupure (CEC) de Favre et al. (2005) et de la Cambridge Behaviour Scale (CBS) de Baron-Cohen & Wheelwright (2004) adaptée en français par L. Weiner et J. Henry (2007). Cette double mesure avec deux instruments différents permet d'avoir un résultat robuste du trait d'empathie et d'être certain que ce trait n'aura pas changé entre le début et la fin de l'étude.

De plus, d'autres mesures auto-rapportées utilisant une échelle de Likert à sept choix (1 : pas du tout d'accord ; 7 : tout à fait d'accord) ont été réalisées, nous permettant de nous informer sur les conditions de passation, les états et les ressentis subjectifs des pianistes :

- Le taux de fatigue
- La proximité avec l'autre binôme
- La difficulté technique du morceau joué seul
- La difficulté technique du morceau joué à deux

- La qualité subjective de leur performance en solo
- La qualité subjective de leur performance à deux
- La difficulté de la mise en place du quatre mains
- La sensation de communication avec le binôme lors de la performance
- L'appréciation et le sentiment d'enrichissement lors de la performance

Ces informations ont été demandées après chaque session d'enregistrement pendant les deux mois d'apprentissage de la pièce musicale.

#### iv. Mesure électroencéphalographique

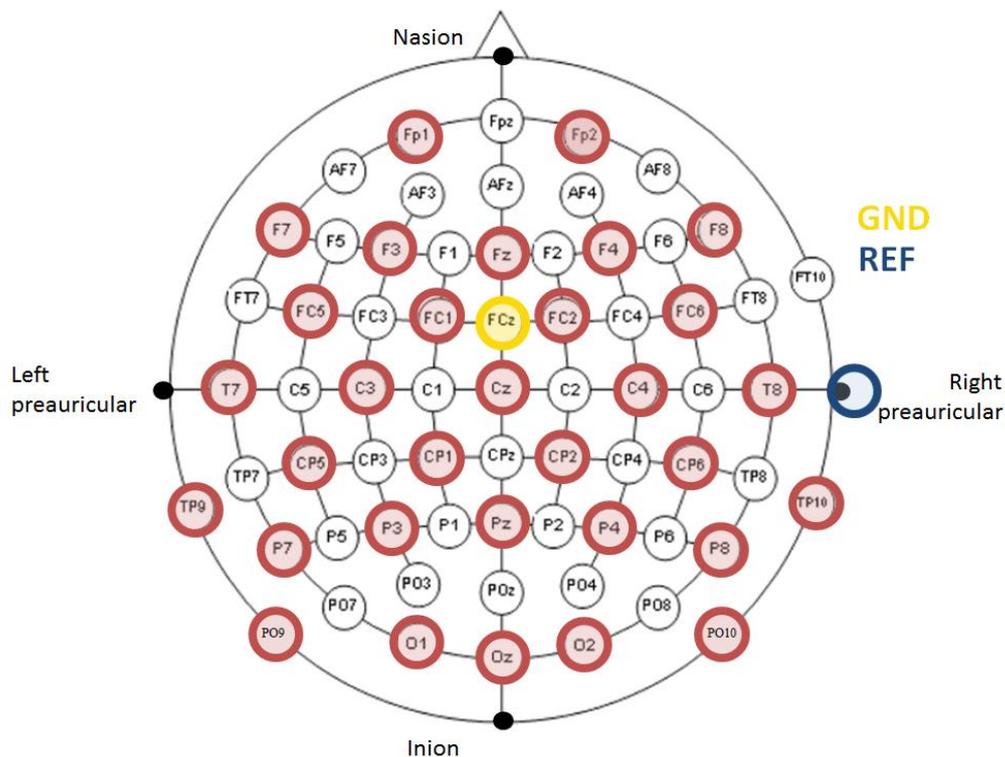
L'activité électroencéphalographique (EEG) des participants a été enregistrée en continu pendant toute la durée de la séquence expérimentale à l'aide de deux casques EEG gGAMMAcap (g.tec, Graz, Austria, <http://www.gtec.at>) de 32 électrodes actives chacun, soit 64 électrodes en tout, positionnées selon la technique standard 10-10 (Chatrian et al., 1985) (**Figure 4.3**). Dans ce setup en hyperscanning-EEG, il est nécessaire que chaque participant possède ses propres électrodes de masse et de référence afin d'éviter des contaminations des signaux des sources cérébrales d'un sujet à l'autre. Pour améliorer la conductivité, un gel de contact (g.GAMMAgel) a été disposé entre le cuir chevelu et les électrodes. Afin de garantir un rapport signal/bruit optimum, nous avons demandé aux sujets d'avoir les cheveux secs, lavés du jour même de l'expérience (au shampoing) et sans gel ni autres produits sur le cuir chevelu. Avant chaque séance expérimentale, l'impédance des électrodes EEG et la qualité des signaux ont été contrôlés et améliorés si nécessaire par un repositionnement du gel et du casque sur la tête du sujet.

Nous utilisons quatre amplificateurs, supportant chacun 16 électrodes, tous reliés ensemble afin de synchroniser leurs horloges internes et de garantir un échantillonnage sans décalage. Les signaux bruts sont recueillis à 512 Hz et passent par trois filtres analogiques au niveau des amplificateurs : un passe-haut à 0.01 Hz, un passe-bas à 100 Hz et un coupe-bande à 50 Hz (fréquence des courants industriels des réseaux électriques). Pour les analyses, les données d'hyperscanning-EEG sont re-filtrées de 1 à 44 Hz et ensuite ré-échantillonnées de 512 à 128 Hz. Les périodes d'artéfacts (mouvements oculaires, musculaires, bruits instrumentaux, etc.) sont repérées visuellement et annotées grâce au logiciel Cartool<sup>1</sup>. Ainsi elles ne seront pas prises en compte dans

---

<sup>1</sup> Le logiciel Cartool ([brainmapping.unige.ch/cartool](http://brainmapping.unige.ch/cartool)) a été programmé par Denis Brunet, du Functional Brain Mapping Laboratory, à Genève, Suisse, et est soutenu par le Centre d'Imagerie Biomédicale (CIBM) de Genève et Lausanne.

les analyses qui suivent. Le matériel EEG que nous avons utilisé (gUSBamp, gGAMMAcap,



**Figure 4.3 Montage EEG utilisé lors de l'expérience.**

Nous posons les électrodes selon un système 10-10 en utilisant un total de 32 électrodes réparties également sur le scalp afin de couvrir la plus grande zone possible. La masse se trouve sur la position FCz et la référence est accrochée au lobe de l'oreille droite.

gEEGelectrodes) est agréé CE et FDA, recherche et médical.

### c. Protocole expérimental

Une fois recrutés et assignés à un duo par l'expert en musicologie, les participants ont alors été invités à programmer au plus tôt leur première séance d'enregistrement dans la salle d'expérience PerSee du département image et signal (DIS) au Gipsa-lab. Il s'agissait là de leur première séance de mise en place du duo : en aucun cas ils ne se sont entraînés *ensemble* au préalable, mais l'ont fait séparément afin de prendre connaissance de l'œuvre. La partie suivante décrit le script expérimental de la première à la sixième (et dernière) séance.

- a) Les participants du duo, s'étant entraînés seuls avant la première séance, sont invités ensemble dans la salle d'accueil de la salle de musique où se passent les expériences. Lors de la **phase 1**, le participant A (tiré au sort) remplit la première partie du questionnaire relatif à l'expérience (**Annexe 6.1** – Questionnaire session) ainsi que deux autres questionnaires (**Annexe 6.2** –

Empathie) permettant d'évaluer son score d'empathie. Ces derniers ne seront remplis qu'à la première et la dernière séance. Pendant ce temps-là, le participant *B* joue sa partie de piano d'une durée de trois minutes environ dans la salle de piano où il est enregistré en audio. Cet enregistrement sera réutilisé par la suite au point **d**. Lorsqu'il a terminé, les deux participants échangent leur place (Le sujet *B* sort de la salle pour remplir le questionnaire session, et le *A* rentre pour jouer sa partie au piano).

- b) Le sujet *B* rejoint le sujet *A* dans la salle de musique et un (ou deux) expérimentateur(s) installe(nt) les casque EEG sur les pianistes. Le dispositif expérimental est composé d'un piano et de deux tabourets en face. Les amplificateurs d'EEG ainsi que l'ordinateur sont placés à l'arrière des pianistes à distance raisonnable pour les laisser libres de mouvements. En face du piano se trouve un appareil d'enregistrement audio ainsi que des enceintes et leur amplificateur. Les pianistes jouent sans partition de manière à ne pas générer de nombreux mouvements oculaires latéraux liés à la lecture.
- c) Les deux phases suivantes sont en situation de "jeu à quatre mains" d'une durée de 10 minutes pour la **phase 2** et de 20 minutes pour la **phase 3** où les pianistes jouent deux fois le morceau à chaque fois, c'est-à-dire deux enregistrements pour la condition duo (condition expérimentale), deux enregistrements pour la condition solo sujet *A* et deux enregistrements pour la condition solo sujet *B* (conditions contrôles)(**Tableau 4.1**). Les instructions de la **phase 2** sont données au début de l'expérience et ne sont pas répétées par la suite :

	Temps (min)	Sujet A	Sujet B
Phase 1	5	Questionnaire Session*	Enregistrement*
	5	Enregistrement*	Questionnaire Session*
	20	Pose de casque EEG	Pose de casque EEG
Phase 2	10	Jeu à Quatre Mains** x2	Jeu à Quatre Mains** x2
	5	Pause	Pause
Phase 3	10	Pause	Jeu avec Enregistrement** x2
	10	Jeu avec Enregistrement** x2	Pause
	5	Casque EEG enlevé	Casque EEG enlevé
	5	Questionnaire Session	Questionnaire Session
	75		



**Tableau 4.1 Design expérimental, exemple de mise en œuvre**

Les \* et \*\* sont réversibles entre eux pour une question de contrebalancement (i.e., à la séance 1, le sujet *A* commencera par le questionnaire tandis qu'à la séance 2 il commencera par l'enregistrement audio). En **bleu clair** sont les moments où les pianistes devront jouer seuls ou ensemble, soit un total de 25 min pour chaque pianiste. L'ensemble des observations se fera en six sessions sur deux mois.

- *« Vous allez maintenant jouer ensemble la pièce que nous vous avons donnée à travailler pendant ces deux prochains mois. »*
- *« Il est tout à fait normal que les premières séances soient difficiles étant donné que vous n'avez pas encore eu le temps de vous entraîner pleinement et d'avoir une bonne mise en place, aussi si vous sentez que vous faites une erreur ou que vous vous perdez, ce n'est pas un problème, continuez à jouer jusqu'à ce que vous ayez terminé. »*
- *« Il est important de jouer de façon la plus naturelle possible, comme si vous vouliez montrer vos progrès à un ami ou vos parents. La seule contrainte sera d'éviter les gestes brusques au niveau de la tête ou des épaules afin de limiter tout artefact dans les enregistrements. »*
- *« Un expérimentateur viendra vous chercher lorsque que vous aurez terminé de jouer ensemble et vous pourrez prendre une pause. »*
- *« A tout moment vous aurez la possibilité de nous avertir si vous voulez arrêter l'expérience en faisant signe dans la salle, ou en nous appelant. »*

d) A l'issue de cette première phase à deux, les pianistes pourront prendre une pause. Lorsque la pause sera terminée, le participant A se mettra en place pour jouer seul, mais toujours avec le participant B à ses côtés qui ne jouera pas. La **phase 3** peut débuter :

- *« Vous allez maintenant jouer seul la pièce que nous vous avons donnée, à la différence que cette fois-ci il y aura un enregistrement sonore à la place de votre partenaire. »*
- *« Il est possible que cet enregistrement ne soit pas parfait, aussi si vous rencontrez des difficultés essayez de coller au mieux avec ce dernier, quelles que soient vos erreurs ou les siennes. »*

- « Un expérimentateur viendra vous chercher lorsque que vous aurez terminé de jouer avec l'enregistrement et vous débarrassera du dispositif EEG lorsque votre partenaire aura réalisé la même tâche que vous. »
- « Une fois encore, à tout moment vous aurez la possibilité de nous avertir si vous voulez arrêter l'expérience en faisant signe dans la salle, ou en nous appelant. »

e) Lorsque le participant A aura terminé, il sera remplacé par le participant B qui suivra la même tâche.

f) A l'issue de chaque session d'expérience, les pianistes du duo seront invités à remplir la deuxième partie du questionnaire session visant à avoir un retour sur l'expérience qu'ils viennent de passer et un retour subjectif sur leur propre performance.

Pour finir, l'expérimentateur programmera la prochaine séance d'enregistrement une dizaine de jours plus tard, et il sera demandé aux pianistes de programmer leur prochaine séance d'entraînement ensemble lors de cette période (un entraînement minimum / deux maximum entre les séances d'enregistrement, selon les disponibilités de chaque pianiste).

Les participants se verront pendant deux mois sur six sessions d'enregistrement en laboratoire et sur cinq à dix sessions d'entraînements communs entre ces sessions (**Tableau 4.2**). L'objectif de cette démarche est de favoriser l'interaction sociale authentique entre les participants en dehors du lieu de l'expérience.

Date d'expérimentation	Activité
<i>J-10 jours</i>	Rencontre préliminaire / Recrutement / Assignation des groupes et partitions
<i>J0</i>	Questionnaire d'Empathie / Questionnaire Session / Enregistrement Audio / Jeu synchronisé / Jeu avec enregistrement
<i>J+10 jours</i>	Questionnaire Session / Enregistrement Audio / Jeu synchronisé / Jeu avec enregistrement
<i>J+20 jours</i>	Questionnaire Session / Enregistrement Audio / Jeu synchronisé / Jeu avec enregistrement
<i>J+30 jours</i>	Questionnaire Session / Enregistrement Audio / Jeu synchronisé / Jeu avec enregistrement
<i>J+40 jours</i>	Questionnaire Session / Enregistrement Audio / Jeu synchronisé / Jeu avec enregistrement
<i>J+50 jours</i>	Questionnaire d'Empathie / Questionnaire Session / Enregistrement Audio / Jeu synchronisé / Jeu avec enregistrement / Rémunération

**Tableau 4.2 Exemple de calendrier type pour un duo de pianiste**

Le recrutement aux entretiens s'est fait à l'aide d'annonces et de listes de diffusions. Les personnes souhaitant participer ont été interviewées au préalable afin de vérifier leur niveau pour les inclure dans un binôme. Lors de ce premier rendez-vous, la première session d'expérience a été programmée une dizaine de jours plus tard.

### III. Analyses des données expérimentales

L'analyse des données de l'expérience comporte plusieurs phases. Dans cette section, nous explorons premièrement l'aspect comportemental de l'expérience en examinant la performance musicale, les questionnaires d'empathie et auto-rapportés des participants. Ensuite, nous passons à l'analyse des signaux EEG en utilisant les outils de séparation de sources aveugle conjointes (jBSS) et appliquons les mesures de synchronie sur les sources communes trouvées. Enfin, dans un troisième temps nous mettons en relation les résultats obtenus dans les deux précédentes catégories afin de répondre à nos hypothèses du début de chapitre.

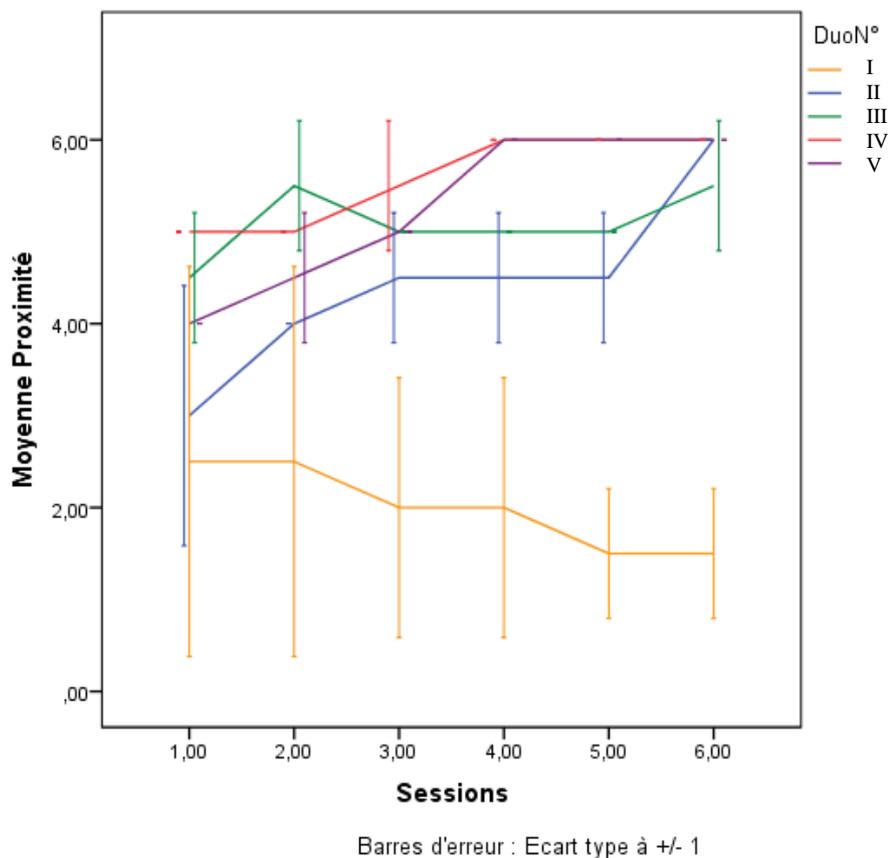
#### a. Résultats comportementaux

Rappelons dans un premier temps l'hypothèse concernant les données comportementales pour les sections à venir :

**H1.** La performance musicale augmentera au cours de l'apprentissage de la pièce. Il devrait y avoir aussi un rapprochement émotionnel des pianistes entre eux qui se traduirait par une amélioration de leur relation.

### i. Exploration des données

Une inspection des données a mis en évidence une anomalie des mesures sur la variable de "sentiment de proximité". En effet, on remarque que l'un des duos montre une tendance inverse aux autres (Figure 4.4). Après investigation, il s'est avéré que les deux pianistes de ce groupe se connaissaient déjà auparavant et avaient vécu ensemble des événements personnels les mettant dans de très mauvaises dispositions émotionnelles. Bien que leur attitude ait été très sérieuse lors des sessions d'enregistrement, nous avons préféré écarter ce duo des analyses de groupe étant donné que notre paradigme repose essentiellement sur la volonté de coopérer ensemble, sur l'empathie et sur l'entente.



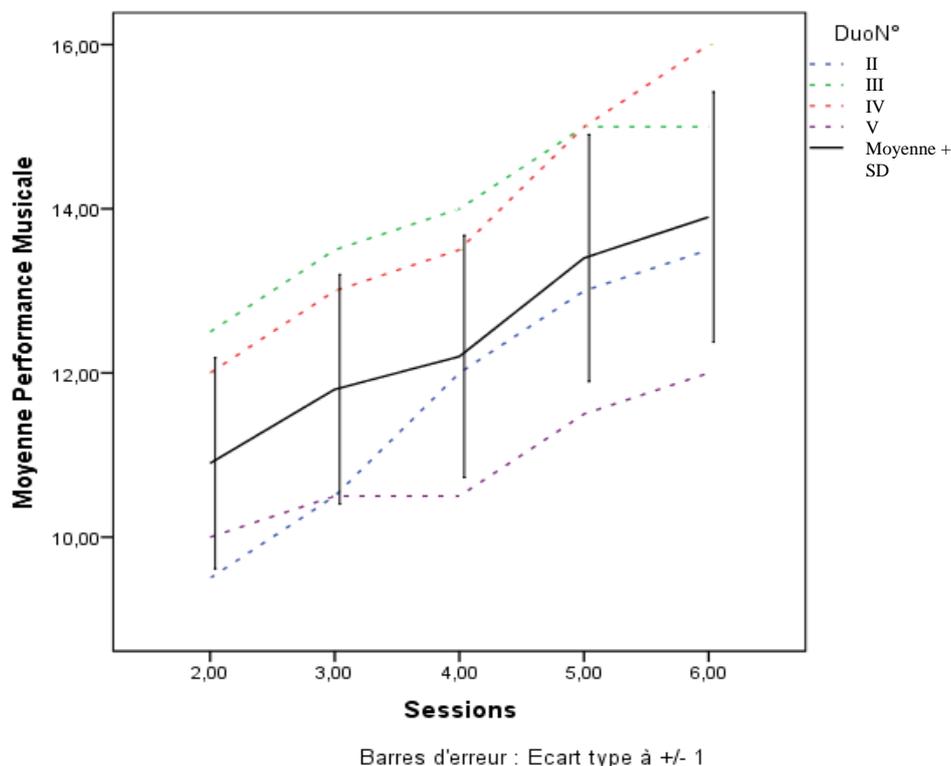
**Figure 4.4** Moyenne des scores de proximité par duo en fonction des sessions.

Sur les cinq duos recrutés, quatre démontrent une tendance à l'augmentation du score de proximité au cours des sessions (score déterminé par un item dans le questionnaire post-session, échelle de Likert de 1 à 7). Le duo n°1 démontre une tendance complètement opposée.

Nous avons aussi fait le choix de rejeter les premières sessions d'enregistrement de tous les groupes étant donné que le niveau de bruitage des signaux EEG était largement au-dessus d'une valeur acceptable (plus de 80% des données bruitées). Les enregistrements des sessions suivantes se sont nettement améliorés (entre 40 et 10% de données bruitées). Ainsi, nous ne porterons nos analyses que sur quatre duos lors des cinq dernières sessions.

## ii. Performance musicale objective

La performance musicale des duos de pianiste a été évaluée en aveugle par un expert en musicologie. Nous lui avons demandé de faire cette évaluation à la manière des auditions dans le contexte académique en musicologie. Ainsi à la fin de notre expérience, l'ensemble des enregistrements audio lui a été communiqué : les fichiers possédaient un numéro d'identification par couple assigné aléatoirement, et les numéros de session furent retirés de manière à n'induire aucun a priori sur la progression des enregistrements (i.e., duo n°1 renommé en 92, et leurs différents enregistrements notés de 1 à 12, deux enregistrements par session, ne reflétaient pas l'ordre chronologique des acquisitions). L'expert nous a ainsi retourné 60 notes dont la moyenne par session est représentée en **Figure 4.5**.



**Figure 4.5 Graphique de la moyenne de la performance musicale en fonction des sessions**

A la session 2 la moyenne des performances musicales est de 10,9 et augmente jusqu'à 13,9 à la session 6 ce qui donne une augmentation moyenne de trois points (~27,5%) sur deux mois. Certains groupes ont mieux progressé que d'autres, notamment le duo n°IV qui a vu une augmentation de quatre points (de 12 à 16) au cours de cette période.

De manière à déterminer s'il existe une différence significative entre les scores de performance au cours de sessions nous avons utilisé une ANOVA en mesure répétées à un facteur (les résultats peuvent être examinés en **Annexe 6.3**). Nos données ne violent pas l'hypothèse de sphéricité déterminée par le test de Mauchly, et nous avons pu reporter un effet principal des sessions  $F(4,28) = 41.879$ ,  $p \ll .0001$ , ainsi qu'une tendance linéaire positive  $F(1,7) = 71.680$ ,  $p \ll .0001$ .

### iii. Analyse des questionnaires et analyse en composante principale

Au début et à la fin de chaque session d'enregistrement, nous faisons passer des questionnaires aux participants afin de s'assurer de leur état de fatigue, du nombre de fois qu'ils se sont vus pour travailler leur pièce de musique et s'ils se sont vus aussi en dehors de ce cadre, et de tout un panel de variables concernant leur relation à l'expérience et leur binôme. De plus, nous avons fait passer deux questionnaires d'empathie (CBS et CEC) à la première et dernière session afin de s'assurer de la stabilité du trait d'empathie au sein des pianistes.

Les participants étaient toujours dans des conditions acceptables pour passer l'expérience, ils se sont vus en moyenne 0.45 fois entre chaque session pour travailler la pièce de musique, certains duos étant plus assidus que d'autres (i.e., duo n°IV s'est vu en moyenne 1,2 fois par semaine), et se sont vu en moyenne 1,5 fois par semaine en dehors de ce contexte. Selon le questionnaire CBS, les pianistes de notre expérience possèdent en moyenne un score d'empathie dans les normes en session 1 ( $M=35.25$ ,  $SD=8.48$ ) et en session 6 ( $M=34.87$ ,  $SD=10.16$ ), un score moyen étant compris entre 33 et 52 (**Annexe 6.2**), qui ne change donc pas au cours du temps. Le questionnaire CEC lui est un peu plus compliqué à interpréter sachant qu'il repose sur trois scores : l'empathie, la contagion émotionnelle et la coupure qui représente la capacité à se détacher des ressentis des autres. Nous donnerons ici les scores séparés sur chaque catégorie. Le score d'empathie des pianistes en session 1 ( $M=8.37$ ,  $SD=1.61$ ) et en session 6 ( $M=7.78$ ,  $SD=1.42$ ) est comparable à la moyenne de l'échantillon de 94 personnes chez Favre et al. (2009) ( $M=7.3$ ,  $SD=2.2$ ). Ce score ne change pas au cours du temps. Le score de contagion émotionnelle quant à lui en session 1 ( $M=5.56$ ,  $SD=2.21$ ) et en session 6 ( $M=6.12$ ,  $SD=2.38$ ) est statistiquement supérieur à la moyenne de la population ( $M=2.8$ ,  $SD=1.7$ ) dans les deux cas,  $t(7)=3.534$ ,  $p < 0.05$  ; et  $t(7)=3.953$ ,  $p < 0.05$  respectivement. Ce score ne change pas au cours du temps. Enfin, le score de coupure en session 1 ( $M=3.59$ ,  $SD=1.03$ ) et en session 6 ( $M=4.21$ ,  $SD=1.99$ ) est statistiquement supérieur à la moyenne de la population ( $M=1.9$ ,  $SD=1.6$ ) dans les deux

cas,  $t(7)=4.631$ ,  $p < 0.05$  ; et  $t(7)=3.298$ ,  $p < 0.05$  respectivement. Ce score ne change pas au cours du temps.

Pour réduire le nombre d'informations sur les variables comportementales restantes, nous avons décidé de faire une analyse en composante principale avec rotation varimax (pour plus de détails, voir l'**Annexe 6.4**). Ainsi, nous avons huit variables représentées par :

- La proximité avec l'autre binôme
- La difficulté technique du morceau joué seul
- La difficulté technique du morceau joué à deux
- La qualité subjective de leur performance en solo
- La qualité subjective de leur performance à deux
- La difficulté de la mise en place du quatre mains
- La sensation de communication avec le binôme lors de la performance
- L'appréciation et le sentiment d'enrichissement lors de la performance

Aucune de ces variables n'a été exclue dû à une trop grande multicolinéarité ou une singularité. La réduction de données s'est faite selon plusieurs critères : la variance totale expliquée (>75%) et le tracé d'effondrement. Après rotation orthogonale (varimax) nous avons pu extraire quatre composantes (**Tableau 4.3**) :

**Rotation de la matrice des composantes<sup>a</sup>**

	Composante			
	C1	C2	C3	C4
Proximité	,816			
Communication	,777			
TechDuo	-,573	-,452	,342	
QualDuo		,845		
QualSolo		,841		
TechSolo			,888	
Enjoy			,665	-,537
MisePlace				,898

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

Méthode de rotation : Varimax avec normalisation Kaiser. <sup>a</sup>

a. Convergence de la rotation dans 5 itérations.

**Tableau 4.3 Matrice des composantes après rotation varimax.**

Quatre composantes ont été extraites de l'analyse en composante principale : la qualité de la relation (C1) corrélant principalement la variable de proximité et de communication, inversement corrélée à la difficulté technique en duo (TechDuo) de la tâche ; la qualité subjective de la performance (C2) corrélant principalement la qualité subjective en duo (QualDuo) et en solo (QualSolo), inversement corrélée à la difficulté technique en duo ; la difficulté technique de la tâche (C3) corrélant la difficulté technique en solo (TechSolo) et en duo, corrélée avec l'appréciation de la tâche (Enjoy) ; et enfin la facilité de coordination (C4), corrélant la variable de mise en place et inversement corrélée à l'appréciation de la tâche.

- C1. La **qualité de la relation** entre pianistes
- C2. La **qualité subjective de la performance**
- C3. La **difficulté technique** de la tâche
- C4. La **facilité de coordination** entre pianistes

Parmi ces quatre composantes, seule la qualité de la relation possède une corrélation de Pearson significative et positive avec la performance musicale,  $r(38) = .319$ ,  $p = .045$ . Cependant, étant donné le nombre de tests de corrélation faits (4), nous corrigeons la valeur  $p$  par la méthode de Bonferroni, soit  $p = 0.05/4 = 0.0125$ . Ainsi, il n'existe qu'une corrélation marginale positive entre la performance musicale mesurée par l'expert en musicologie et la composante de la qualité de la relation.

Les résultats comportementaux que nous avons obtenus nous donnent des preuves pour rejeter l'hypothèse nulle de **H1**. Il y a effectivement eu un effet de l'apprentissage de la pièce de musique dans les duos de pianistes, et sont donc meilleurs après deux mois d'entraînement (Voir 4.III.a.ii). De plus la composante de qualité de la relation que nous avons extraite est corrélée marginalement et positivement avec la performance musicale. Ainsi, lorsque celle-ci augmente au cours du temps, la qualité de la relation en fait de même (Voir 4.III.a.iii).

## **b. Résultats en EEG**

Rappelons l'hypothèse que nous avons formulée au début de ce chapitre concernant les données EEG, et ce que la littérature en hyperscanning-EEG nous indique :

**H2. a)** Nous nous attendons à une **augmentation ou une apparition de la synchronisation** au fur et à mesure des sessions. La **synchronisation cérébrale** devrait être significativement **différente** lorsque la musique est jouée **en duo par rapport** à lorsqu'elle est jouée avec un **enregistrement** simulant simplement la présence auditive du partenaire.

**b)** La **synchronisation cérébrale** devrait être significativement **différente** lors des périodes de **qualité musicale exceptionnelle** par rapport aux périodes de **qualité normale**.

En termes de localisation cérébrale, nous avons pu voir dans la littérature en hyperscanning que dans le cas d'une tâche d'interaction sociale avec une composante émotionnelle, par exemple dans un groupe de musique ou dans un couple (Anders et al. , 2011; Babiloni et al., 2012), les régions

ventromédiales préfrontales, gyrus inférieur préfrontal, gyrus post-central et médial-frontal étaient impliquées. De plus, au vu de la tâche expérimentale employée, nous nous attendons à retrouver des activités cérébrales au niveau des aires de bas-niveau impliquées dans la perception tactile et la production motrice de la musique, et bien entendu dans le cortex auditif (Chen et al., 2008; Jarvis, 2004; Zatorre et al., 2007).

La littérature montre l'existence d'une asymétrie dans la synchronisation cérébrale (Dumas et al., 2010; Konvalinka et al., 2014; Sängler, Müller, & Lindenberger, 2013), impliquant les régions frontales du leader ainsi que les sites pariétaux du partenaire. Notre activité expérimentale ne fait pas état de tels rôles *per se* et encourage l'écoute et l'échange réciproques continus. Cependant nous pouvons admettre qu'il existe une différence dans l'activité musicale des deux pianistes. En effet, l'un des deux s'occupe de la partie dite "basse" qui concerne les graves et le rythme, tandis que son partenaire occupe la partie "haute" concernant les aigus et joue la mélodie. Ainsi, dans le choix des sources à analyser nous avons favorisé les sources frontales issues du pianiste s'occupant du rythme, que nous appellerons "leader" par rapport à son partenaire que nous nommerons "follower". En effet, le rythme est un socle crucial de la structure en musique (Cooper & Meyer, 1963), qui peut être déterminé par exemple par un chef d'orchestre (Kirwan, 2007), ou par un métronome. Dans notre cas, puisque nous n'utilisons pas de métronome, c'est le pianiste leader qui donne le rythme. Nous n'avons pas fait d'hypothèse quant à la localisation spatiale des sources du pianiste "follower".

D'un point de vue fréquentiel, il existe toute une série d'études en hyperscanning-EEG employant le paradigme de la musique (deux guitaristes) nous suggérant que nous devrions trouver une augmentation de la synchronisation inter-cérébrale dans la bande de fréquence theta (4-7 Hz) au niveau du cortex frontal et pariétal (Lindenberger et al., 2009; Müller et al., 2013; Sängler et al., 2012; Sängler et al., 2013). Afin de simplifier nos analyses, nous ne considérerons pas de possibles couplages inter-fréquences et nous nous focaliserons donc sur une même bande de fréquences entre chaque pianiste d'un même duo.

Enfin, nous nous attendons à retrouver une synchronisation cérébrale significativement plus forte lorsque les pianistes jouent en duo plutôt que lorsqu'ils jouent en solo avec l'enregistrement de leur partenaire. Ce phénomène devrait se produire plus régulièrement et avec plus d'intensité lors des dernières sessions comparées aux premières étant donné l'apprentissage du morceau de musique et l'évolution de la relation entre les musiciens. De plus, nous envisageons que dans la

condition de jeu à deux, il existe des périodes de synchronisation cérébrale accrue correspondant à des moments où la performance musicale est particulièrement de qualité.

Nous souhaitons faire remarquer que le protocole expérimental a été élaboré afin de bénéficier au maximum d'une approche écologique de l'interaction sociale. Aussi, nos analyses se font sur des données en continu (deux essais par condition : duo, solo-leader, solo-follower) et non sur des données moyennées sur de nombreux essais comme on peut le retrouver dans les potentiels évoqués. En effet, nous désirions privilégier la production d'un morceau de trois minutes plutôt que de répéter dix secondes un extrait (Lindenberger et al., 2009) afin de permettre aux participants de s'investir dans la tâche.

### **i. Méthode**

Notre démarche consiste tout d'abord à sélectionner une source de l'activité cérébrale enregistrée en EEG. Afin d'y parvenir, nous exploitons les outils de séparation de source aveugle conjointe (jBSS) décrit dans le Chapitre 3, section III.c, de manière à tirer profit d'une possible structure de dépendance dans les données inter-sujet des pianistes (Chatel-Goldman et al., 2013). Une fois la source d'intérêt sélectionnée (frontale pour le leader), une mesure de synchronisation cérébrale est calculée dans la bande de fréquence d'intérêt (theta : de 5 à 6 Hz). Enfin, ces mesures sont statistiquement comparées entre les conditions expérimentales et contrôles pour tester nos hypothèses. Rappelons qu'il existe trois conditions expérimentales, deux trials par condition, cinq sessions d'enregistrement et quatre duo de pianistes (soit six enregistrements par session, 30 enregistrements par duo, donc 120 au total).

Le déroulement des analyses s'opère ainsi pour chaque session:

1. Examen des signaux EEG (i.e., rejet d'artefact et de canaux défectueux)
2. Standardisation des signaux EEG par la puissance moyenne de chaque sujet
3. Filtrage passe-bande des signaux dans une gamme de fréquence plus faible que celle enregistrée
4. Estimation des statistiques de second-ordre dans le domaine de Fourier (matrices cospectrales de Fourier)
5. Estimation des sources par la jBSS sur les matrices cospectrales

6. Calcul des matrices inter-spectrales des sources
7. Sélection d'une source en fonction des critères spatiaux et fréquentiels (sLoreta : Pascual-Marqui, 2002)
8. Analyse de la puissance des matrices cospectrales de chaque sujet avec une ANOVA à mesure répétée selon les conditions et les sessions
9. Calcul de l'indice de synchronisation (Cohérence et PLV) sur la bande de fréquence d'intérêt sur des données réelles de chaque condition
10. Même opération que précédemment sur des données mélangées entre les conditions (données surrogates)
11. Tests statistiques pour évaluer la significativité de la différence des scores d'index entre les données réelles et les données surrogates

Détaillons maintenant avec plus de précision chacune de ces étapes.

**(1)** Nous examinons les données EEG grâce au logiciel de visualisation Cartool afin de tagger manuellement les artéfacts (i.e., clignement d'yeux, activité musculaire) et de rejeter les canaux défectueux. Ainsi, un canal présentant un problème lors d'une session sera retiré dans toutes les sessions. Notons aussi que si seul l'un des musiciens cligne des yeux, la portion toute entière sera annotée comme étant un artefact même si son partenaire présente un EEG non bruité.

**(2)** Par la suite, nous standardisons les données EEG par la puissance moyenne de chaque jeu de données afin d'éviter que les statistiques inter- ne soient biaisées par la contribution plus important de l'un des deux participants.

**(3)** Nous appliquons ensuite un filtrage numérique de type FIR dans le sens direct et inverse de manière à ne pas avoir de déphasage dans la bande de 1 à 32 Hz (choix de bande arbitraire motivé par les données en littérature, nous estimons que les fréquences en dehors de cette bande n'apportent pas plus d'information et sont donc inutile pour la séparation de source à venir).

**(4)** Comme nous l'avons décrit dans la Section III.b du chapitre précédent, nous pensons qu'il est préférable de nous baser sur les statistiques de second ordre pour réaliser la séparation de source conjointe (jBSS) (Congedo et al., 2008) selon nos hypothèses sur les propriétés des sources en elles-même (statistique intra-), et sur leur inter-dépendance (statistique inter-). Afin de garantir un bon compromis entre l'estimation de ces statistiques et la prise en compte des caractéristiques

fréquentielles de nos signaux, nous estimons conjointement les matrices cospectrales avec une définition de 0.5 Hz.

(5) La jBSS est alors appliquée sur ces matrices inter-spectrales en utilisant un algorithme appelé JNoLAD (Joint Non Orthogonal Linear Approximate Diagonalisation) issu des outils de Gong et al.(2015).

(6) Lorsque les matrices de démixage  $B_m$ , pour les deux sujets  $m \in \{1,2\}$ , sont estimées, pour trouver les matrices inter-spectrales des sources il suffit de les multiplier aux matrices cospectrales  $C$  comme ceci :  $S_{m,k} = B_m^T C_{m,k} B_m$  (Voir Chapitre 3, Section III.a).

(7) Maintenant que nous nous trouvons dans l'espace des sources, nous sélectionnons celles spatialement localisées dans le cortex frontal chez le pianiste leader en explorant les données grâce à la solution inverse sLoreta. Cette source doit préférentiellement correspondre à la même zone à chaque session. La source associé au pianiste follower n'est pas soumise à des prérequis spatiaux en particulier et peut varier d'une session à l'autre.

(8) Avant de calculer la synchronisation inter-cérébrale, nous analysons tout d'abord la puissance des sources sélectionnées en intra au sein de chaque sujet. Pour cela nous avons recours à une ANOVA à mesure répétées selon deux facteurs : les conditions expérimentales et contrôles, et les sessions. L'objectif est de tester l'hypothèse nulle pour laquelle il n'existe pas de différence dans la puissance de ces sources.

(9) Nous calculons ensuite l'indice de synchronisation cérébral (Cohérence et PLV) entre les sources correspondantes de chaque pianiste. Pour rappel (Chapitre 3.II.e) la PLV estime les périodes de synchronie de phase entre deux signaux sans prendre en compte l'information d'amplitude, ce qui est le cas de la cohérence. Dans la suite des analyses nous ne présenterons que les résultats de la cohérence, ceux de la PLV étant similaires seront reportés en **Annexe 6.5**.

Notre objectif est de savoir s'il existe une différence dans le degré de synchronisation entre les différentes conditions expérimentales et contrôles. Etant donné le peu de données que nous possédons, nous avons décidé d'emprunter des méthodes de ré-échantillonnage. Dans un premier temps, nous prenons aléatoirement 90 fenêtres de 0.5 secondes dans chaque condition. Si la fenêtre comporte ou chevauche un artéfact, on procède à un retraitage aléatoire dans les données jusqu'à obtenir une fenêtre sans artéfact. Nous calculons par la suite la cohérence sur la bande de 5-6 Hz sur ces 90 fenêtres de 0.5 seconde (64 échantillons d'une résolution fréquentielle à 2 Hz) et obtenons un score global de cohérence. Nous avons maintenant six scores de cohérence, un par condition et par trial (duo, solo-leader, solo-follower ; trial 1, trial 2) et nous calculons la différence absolue entre chaque condition ce qui correspondra à la valeur observée.

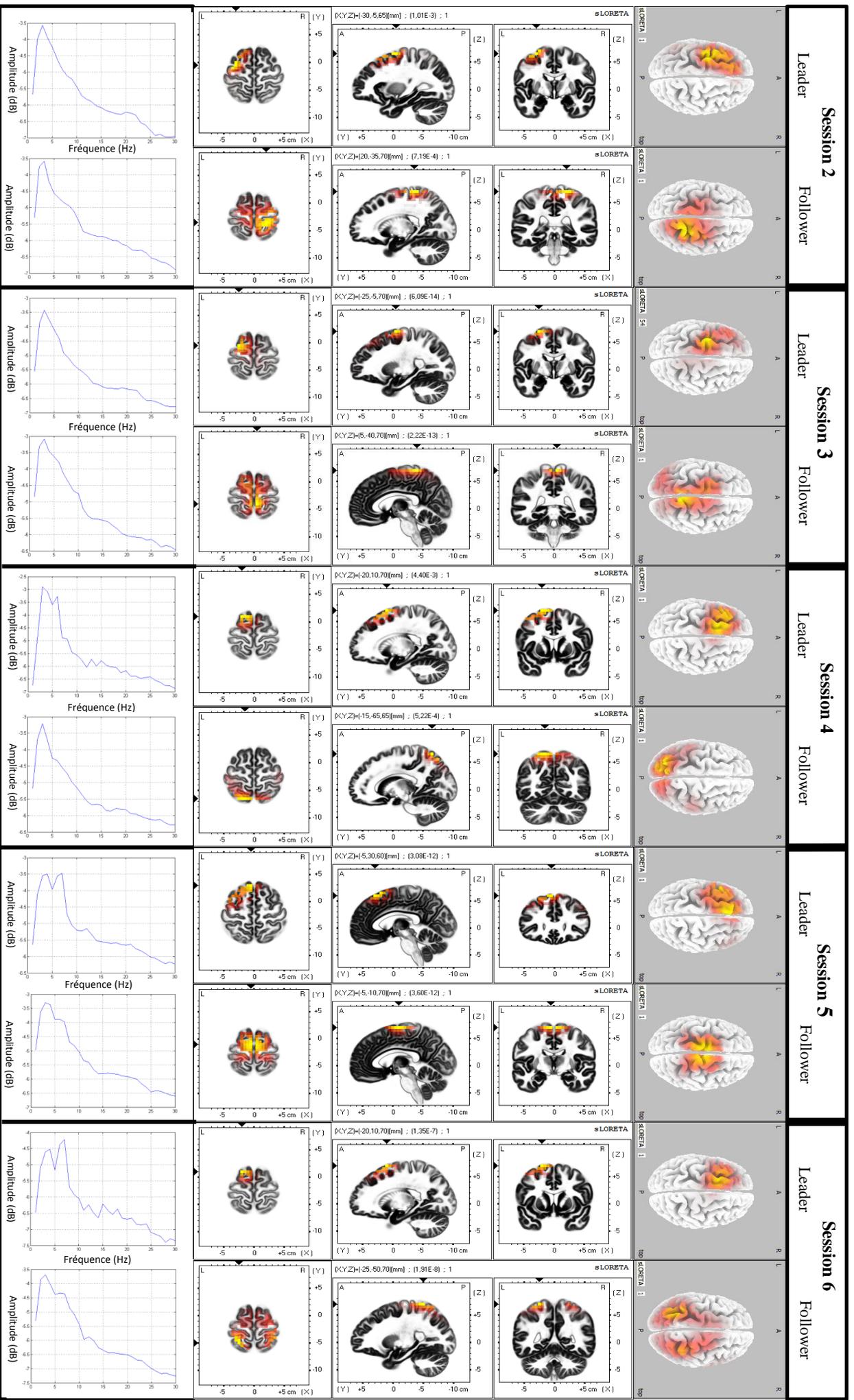
(10) Dans un deuxième temps, nous prenons de nouveau 90 fenêtres tirées aléatoirement dans chaque condition, puis nous mélangeons aléatoirement ces fenêtres entre les conditions afin de créer des données surrogates. Nous déterminons à nouveau le score de cohérence de ces données, puis calculons la différence absolue de ces scores entre chaque condition. Enfin, nous comparons ces différences sur données surrogates par rapport à celles obtenues sur données observées.

(11) Cette opération est répétée en tout 5000 fois et nous permet d'obtenir à la fin une valeur de probabilité correspondant au nombre de fois que la différence absolue des données artificielles est supérieure ou égale à celle des données observées, celle-ci incluse, soit :  $p = \text{nb}(\text{Diff}_{\text{artif}} > \text{Diff}_{\text{obs}}) / N_{\text{permut}}$  (ainsi, la valeur minimale possible, si aucune valeur artificielle est supérieure ou égale à la valeur observée, est de  $1/5000$ , soit  $p = 0.0002$ ). Cette procédure est un test de Monte Carlo et présente l'avantage d'être applicable sur tout type de distribution de données et d'être non-paramétrique (Edgington & Onghena, 2007; Manly, 2006). Etant donné que nous réalisons trois tests (Duo vs Solo-Leader, Duo vs Solo-Follower, Solo-Leader vs Solo-Follower), nous décidons de réajuster le seuil  $p$  en utilisant une correction de Bonferroni, soit  $p_{\text{corrigé}} = p / \text{nb tests} = 0.05 / 3 = 0.0167$ .

## ii. Résultats

### Duo vs Solo

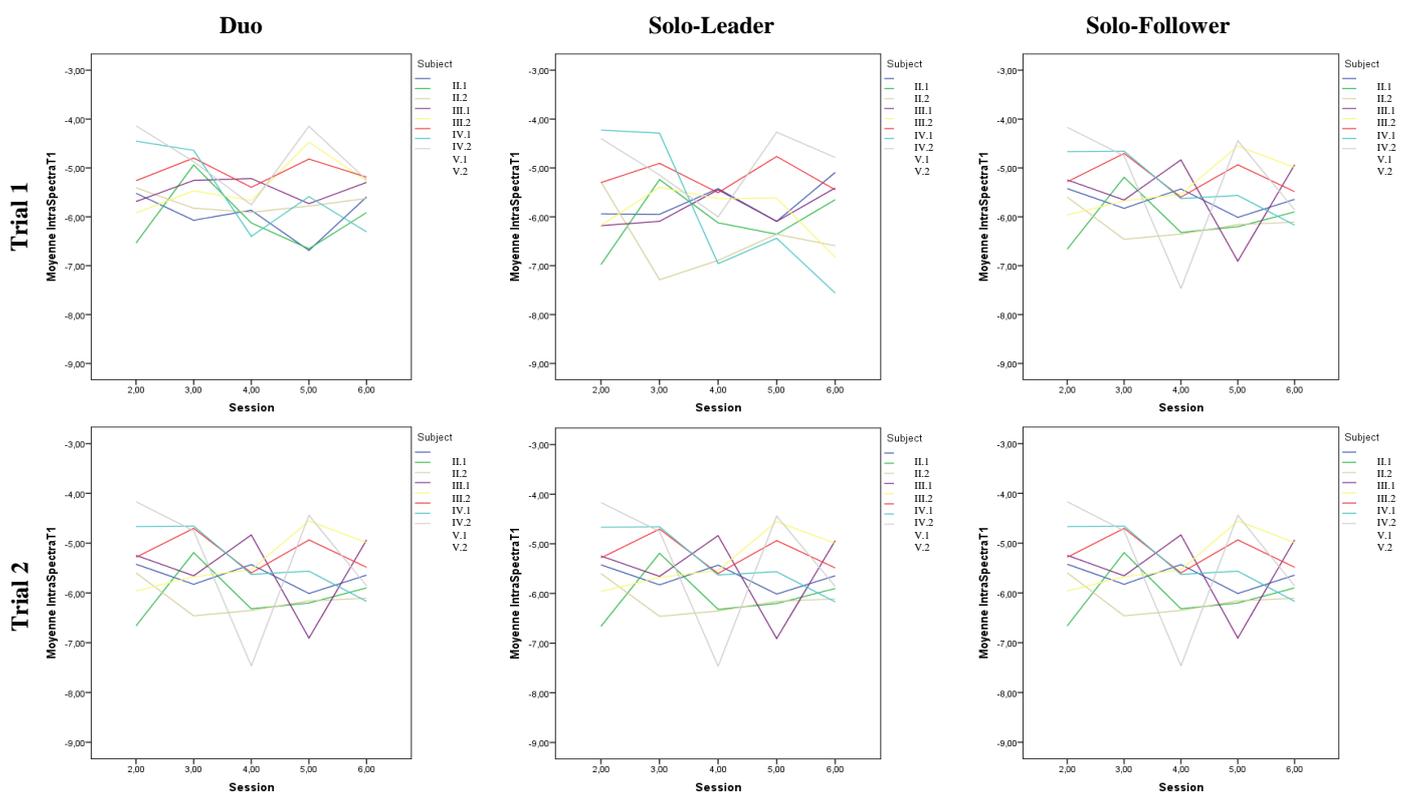
Cette section concerne l'hypothèse de différence entre la condition expérimentale Duo vs Solo dont nous présentons les résultats principaux. Dans un premier temps, nous nous intéressons aux résultats de la séparation de source et spécifiquement sur notre sélection de sources chez le pianiste leader selon les critères énoncés plus haut. Dans l'ensemble et chez presque tous les couples, elles correspondent à chaque fois au même profil avec une localisation spatiale très proche à chaque session (frontal gauche, cortex prémoteur BA6), et dans chaque condition expérimentale. Un point intéressant à remarquer est que même en l'absence de critères spécifiques pour la source correspondante du pianiste follower, cette dernière se retrouve presque à chaque fois dans la même aire cérébrale (cortex pariétal postérieur). Ce phénomène est particulièrement notable chez le duo n°IV (**Figure 4.6**). Nous remarquons aussi la similitude du profil spectral des sources pour le leader et follower, même si la localisation est différente.



**Figure 4.6 Localisation et spectre des sources d'intérêt par session et par pianiste dans le duo n°1V**

Chez le pianiste leader on retrouve la même source session après session (cortex prémoteur, BA6), alors que chez le pianiste follower cette source se situe au niveau de l'aire motrice primaire (BA4) dans les premières sessions (2 à 3), glisse vers le cortex pariétal postérieur (BA 7) lors de la session 4, se situe dans le cortex prémoteur (BA6) dans la session 5, et revient vers le cortex pariétal postérieur (BA5 et BA7) dans la session 6. L'amplitude du spectre dans la bande de fréquence 5-6 Hz chez les deux pianistes est notable dans les sessions 5 et 6, ce qui n'est pas le cas des premières sessions (2,3,4).

Nous testons l'hypothèse qu'il existe une différence de puissance dans les sources estimées sélectionnées entre les conditions expérimentales et les sessions. Pour cela, nous avons réalisé une ANOVA en mesure répétées selon ces deux facteurs, sur les deux essais. Nos données ne violent pas l'hypothèse de sphéricité déterminée par le test de Mauchly et il n'existe aucun effet principal, que ce soit pour les sessions ou les conditions. Pour plus de précision sur ce test, voir l'Annexe 6.6. Nous pouvons donc en conclure qu'il n'existe pas de différence significative dans la puissance des sources en intra- que ce soit entre les conditions expérimentales ou à travers les sessions (Figure 4.7).



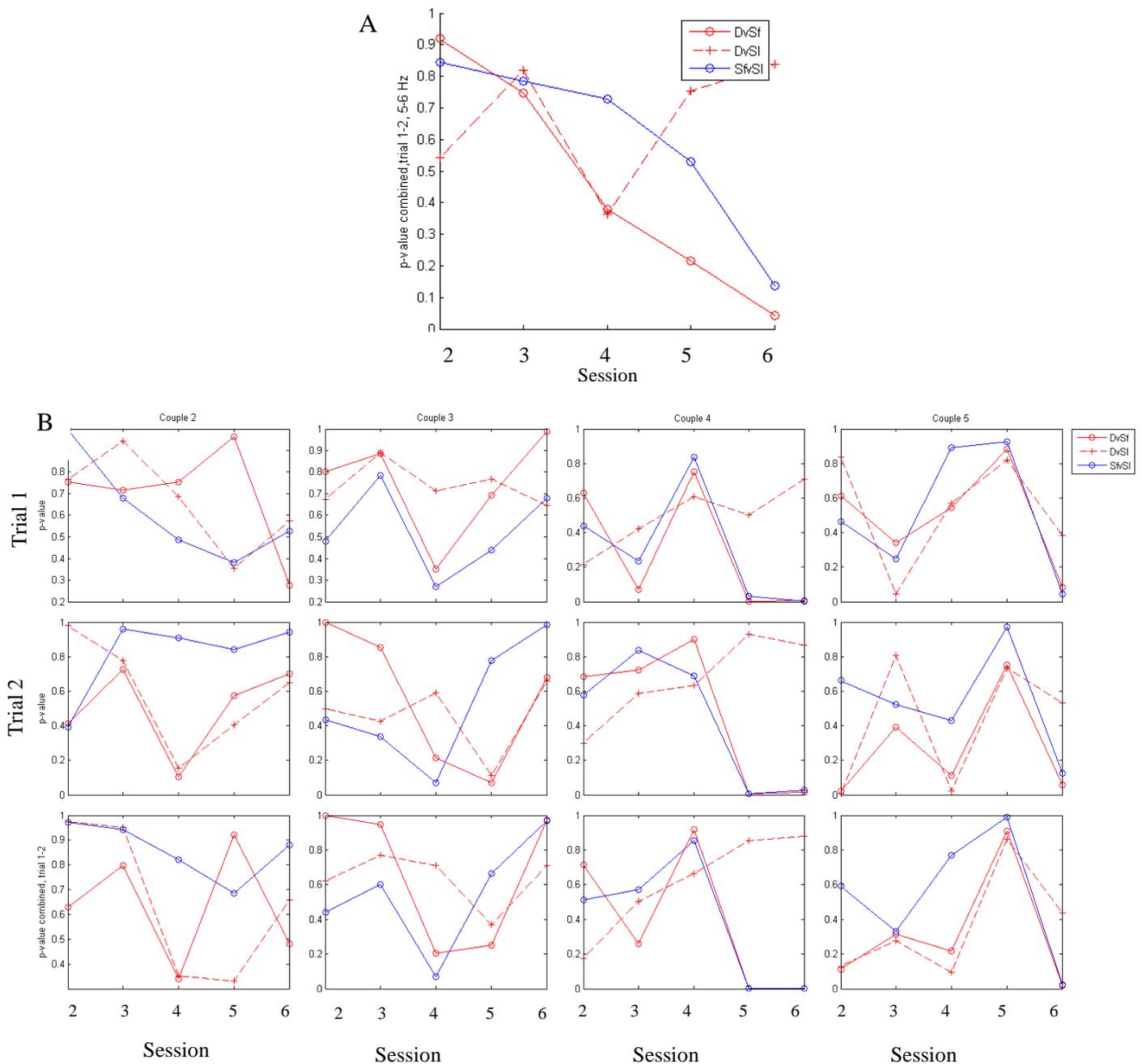
**Figure 4.7** Logarithme de la puissance intra-individuelle de chaque pianiste pour la source sélectionnée en fonction des sessions, selon chaque condition et sur chaque trial.

Aucun effet principal de la condition expérimentale ou des sessions n'a été mis en évidence lorsque nous avons examiné la puissance intra-individuelle de chaque pianiste. Nous pouvons donc en conclure qu'il n'y a pas de changement dans la puissance des sources sélectionnées.

Ensuite, nous calculons la cohérence entre chaque pianiste de chaque duo pour toutes les sessions, trials et conditions sur les sources d'intérêt que nous avons sélectionnées, selon la méthode de ré-échantillonnage décrite en (9) (pour les données observées et surrogates). Après avoir réalisé la procédure de tests de Monte Carlo, nous nous retrouvons avec des valeurs  $p$  issues des comparaisons entre conditions expérimentales et contrôles pour chaque duo, session et trial (11). Nous combinons ensemble les valeurs  $p$  selon chaque condition. Cette procédure est une

combinaison paramétrique des valeurs  $p$  et il existe plusieurs fonctions de combinaison (**Annexe 6.7**). Nous utilisons la combinaison Gaussienne.

Nous remarquons qu'il existe une tendance à la diminution de la valeur  $p$  valide sous l'hypothèse que les valeurs  $p$  sont indépendantes, et donc une augmentation de la significativité au cours des sessions en ce qui concerne la différence de cohérence entre la condition Duo et la condition Solo-follower,  $r(3) = -.989$ ,  $p < .01$ , (**Figure 4.8**), pour une valeur minimale de  $p = 0.041$ , non significative ( $p_{\text{corrigé}} = 0.0167$ ), atteinte en session 6. La comparaison entre Solo-leader et Solo-follower montre une tendance similaire,  $r(3) = -.919$ ,  $p < .05$ , alors que la comparaison Duo et Solo-leader ne montre aucune tendance à diminuer avec le temps. Si l'on examine la moyenne des scores de dépendance de chacune des conditions, on retrouve cet effet non significatif. La synchronisation cérébrale définie par la cohérence est aussi plus élevée dans la condition Duo que dans celle où le pianiste leader joue seul et que son partenaire l'écoute jouer (**Figure 4.9.A**).



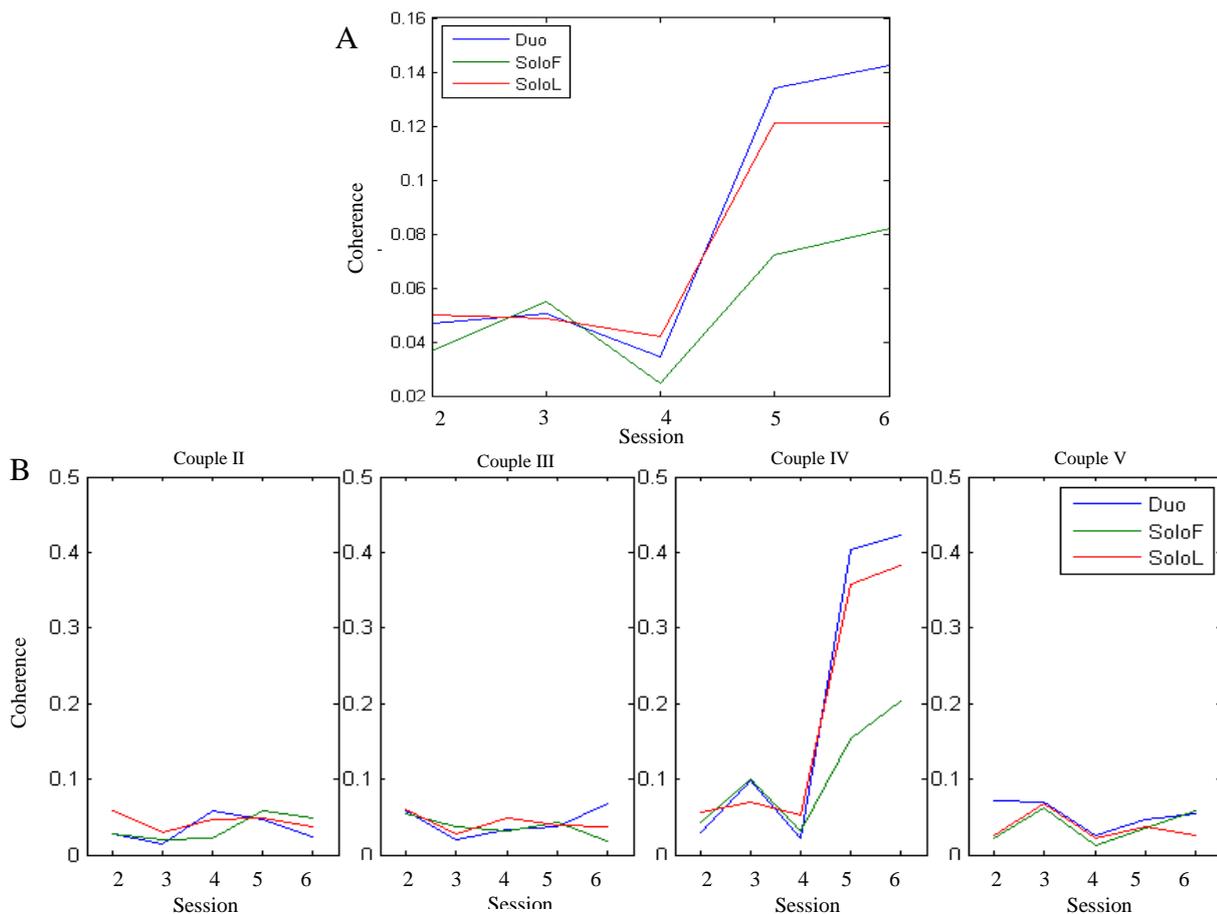
**Figure 4.8 Valeurs  $p$  issues des comparaisons et tests de permutation entre conditions contrôles et expérimentales en fonction des sessions.**

**(A)** Combinaison totale des valeurs  $p$  entre tous les duos en fonction des sessions et selon les comparaisons de conditions. En rouge sont les comparaisons entre condition expérimentale (Duo) et conditions contrôles (Solo). En trait plein il s'agit de Solo-follower et en pointillé Solo-leader. En bleu est la comparaison entre les deux conditions contrôles (Solo). Nous remarquons que la significativité de Duo vs Solo-follower et Solo-leader vs Solo-follower augmente avec le temps (valeur  $p$  qui diminue) sans pour autant atteindre le seuil de significativité corrigé ( $p = 0.0167$ ) à la session 6 pour l'un ou l'autre ( $p = 0.041$  ;  $p = 0.136$ ).

**(B)** Valeurs  $p$  de chaque duo pour chaque session et chaque comparaison de condition sur chaque trial. La dernière ligne correspond à la combinaison des valeurs  $p$  obtenues sur les deux trials. Le duo n°IV montre une différence flagrante par rapport aux autres groupes au niveau des sessions 5 et 6. En effet, la combinaison des valeurs  $p$  est très inférieure au seuil corrigé ( $p \ll 0.0167$ ). Aucun des autres duos n'atteignent de telles valeurs.

Cette augmentation de la significativité au cours du temps nous incite à regarder les données au niveau individuel afin de comprendre plus en profondeur le phénomène et d'explorer la contribution de chaque duo de pianiste. Un examen de la cohérence moyenne de chaque duo et

session démontre clairement la contribution principale du duo n°IV à l'effet de groupe, avec des valeurs de cohérence atteignant jusqu'à 0.456 alors que les autres groupes atteignent une cohérence maximale de 0.114 sur une échelle de 0 à 1 (**Figure 4.9.B**). En effet, sur les sessions 5 et 6 la valeur  $p$  de la différence entre Duo et Solo-follower, et celle entre Solo-leader et Solo-follower est très largement significative ( $p \ll 0.0167$ ) dans les deux trials. Cette énorme différence de cohérence entre les duos et les sessions engendre de nouvelles questions dont nous débattons dans la section discussion.



**Figure 4.9 Cohérence calculée sur les sources sélectionnées en fonction de chaque session, selon chaque condition expérimentale.**

(A) Moyenne de la cohérence calculée sur chaque duo en fonction des sessions et des conditions expérimentales (Bleu : Duo ; Rouge : Solo-leader ; Vert : Solo-follower). Globalement, la cohérence semble plus élevée dans les sessions 5 et 6.

(B) Moyenne de la cohérence calculée pour chaque duo sur les deux trials en fonction des sessions et des conditions de l'expérience. Nous remarquons que le duo n°IV possède la plus grande augmentation de cohérence sur les deux dernières sessions.

Nous rejetons l'hypothèse nulle de **H2.a** car nous avons mis en évidence une augmentation de la synchronisation au fur et à mesure des sessions. La synchronisation cérébrale est significativement différente pour le duo n°IV, et marginale pour le groupe, lorsque la musique est jouée en duo par rapport à lorsqu'elle est jouée avec un enregistrement simulant simplement la présence auditive du partenaire.

## High Quality vs Normal Quality

Cette section concerne l'hypothèse de différence entre la condition de Haute Qualité (HQ) et celle de Qualité Normale (NQ), soit **H2.b**. Rappelons que ces périodes de 30 secondes ont été déterminées par l'expert en musicologie. Au nombre de deux par enregistrement, soit 60 secondes en tout, l'expert avait pour instruction de repérer les moments témoignant d'une coordination musicale particulièrement bonne qui donnait lieu à une performance musicale plus agréable à écouter par rapport au reste du morceau.

Ici aussi les résultats de la séparation de sources étaient satisfaisants mais en deçà du niveau de qualité de la section précédente. En effet, les aires cérébrales retrouvées ne correspondent pas au même espace cérébral d'une session à l'autre, que ce soit pour le pianiste leader ou le pianiste follower. D'un point de vue des tests statistiques, nous avons suivi la même procédure que précédemment et avons étudié la possibilité d'une différence de puissance intra chez chaque sujet. Pour cela, nous avons réalisé une ANOVA en mesure répétées selon deux facteurs : sessions et conditions. Nos données ne violent pas l'hypothèse de sphéricité déterminée par le test de Mauchly. Il existe un effet principal des conditions (HQ, NQ) dans le premier trial,  $F(1,7) = 7.495$ ,  $p = .029$ ; et dans le second,  $F(1,7) = 6.961$ ,  $p = .034$ . Il n'y a pas d'effet principal des sessions dans le premier trial ou le second. Enfin, il y a un effet d'interaction uniquement dans le premier trial,  $F(4,28) = 3.379$ ,  $p = .022$ ; mais pas dans le second (**Annexe 6.8**). Nous ne pouvons établir la répétabilité de nos tests sur les deux trials que pour la différence de puissance en intra pour les deux conditions (HQ et NQ), ainsi nous ne pouvons pas nous prononcer sur l'interaction.

Nos calculs de tests statistiques sur la cohérence ne donnent aucun résultat significatif, ce qui est aussi le cas pour la mesure de PLV. Une raison possible de ce résultat est la perte de puissance statistique due au fait que nous possédons moins de données que dans la condition précédente (environ une minute de données contre trois minutes). En effet, dans ce cas nous ne prenons que 45 fenêtres de 0.5 seconde lorsque nous effectuons le ré-échantillonnage du point (9) de la méthode (Chapitre 4, Section III.b.i). Il est aussi possible que la jBSS ne puisse séparer correctement les sources d'intérêt. Ainsi, nous préférons ne pas poursuivre plus loin ces analyses, et nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle **H2.b**.

### c. Corrélation entre l'EEG et les données comportementales

Dans cette dernière section, nous nous intéressons à la corrélation entre les données provenant à la fois des relevés comportementaux par questionnaires et évaluation de la performance musicale, avec la synchronisation cérébrale mise en évidence dans les enregistrements EEG. Rappelons l'hypothèse concernée :

**H3.** L'activation conjointe et l'activité cérébrale des participants peuvent être dépendantes de la force et du type de lien entre les deux pianistes d'un binôme. Ainsi nous pensons que la caractérisation des activations sera différente selon les groupes de pianistes et qu'elle pourra avoir une répercussion sur la qualité de la performance musicale. Il devrait donc avoir une **corrélation entre synchronisation cérébrale, la qualité de leur jeu et la qualité de leur relation.**

Pour atteindre cet objectif, nous procédons à des tests de corrélations entre la composante de qualité de relation que nous avons calculé précédemment (**Tableau 4.3**), la performance musicale objective déterminée par l'expert en musicologie, et la cohérence de la condition expérimentale (duo) comme indice de synchronisation cérébrale. Etant donné que nous réalisons trois tests sous cette hypothèse, notre correction de Bonferroni est de  $p_{\text{corrigé}} = 0.5 / 3 = 0.0167$ .

Nous mettons en évidence qu'il existe une corrélation marginale entre la Performance Musicale et la Qualité de la relation,  $r(38) = .319$ ,  $p = .045$  ; une corrélation positive et significative entre la Performance Musicale et la Cohérence,  $r(38) = .414$ ,  $p < 0.0167$  ; et une corrélation positive et significative entre la Cohérence et la Qualité de la relation,  $r(38) = .512$ ,  $p < 0.0167$ . Ainsi, nous apportons des preuves contre l'hypothèse nulle de **H3**.

## IV. Discussion

Les résultats de cette expérience répondent à la plupart de nos hypothèses formulées en début de ce chapitre, et font surgir de nouvelles questions dont nous débattons dans cette section.

## Synthèse des résultats :

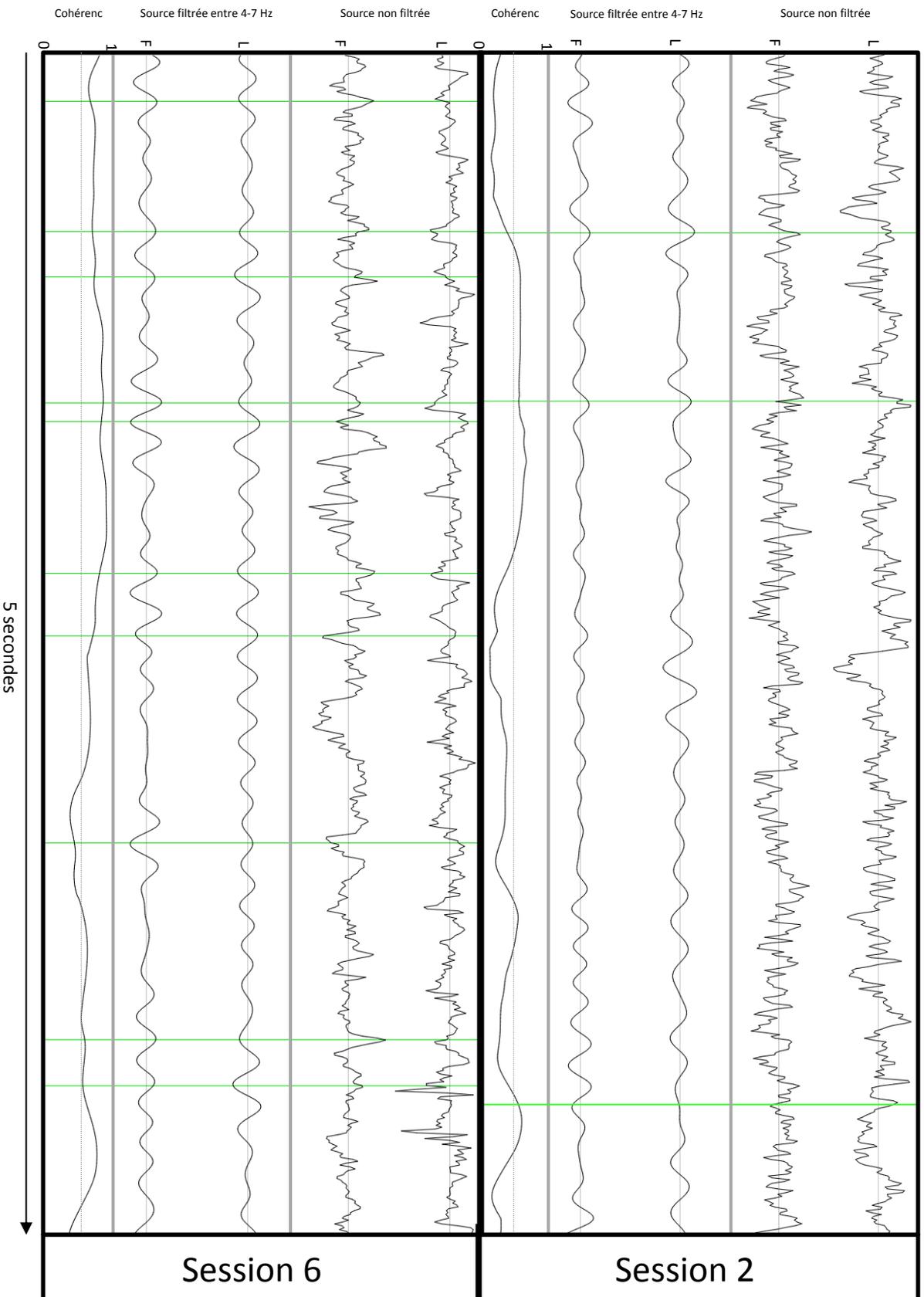
Le fait que seuls les trials des sessions 5 et 6 du duo n°IV présentent une aussi grande hausse dans la cohérence, phénomène absent chez les autres duos, nous invite à nous demander s'il ne s'agit pas d'une erreur de mesure ou d'artefacts. L'examen des traces EEG de ce couple ne présente aucune anomalie ou différence dans les dernières sessions par rapport aux premières, uniquement une augmentation de l'EEG exploitable (**Figure 4.10 et Annexe 6.9**).



**Figure 4.10** Trace EEG du duo n°IV dans la session 6 en condition duo.

Un échantillon représentatif des traces EEG du duo n°IV, la partie supérieure correspondant au pianiste leader et la partie inférieure au pianiste follower. Les autres échantillons des autres sessions sont disponibles en annexe 6.10 et sont similaires à ce tracé. Dans cet échantillon nous avons éliminé les canaux des électrodes occipitales et deux frontales (Fp1 et Fp2) pour plus de visibilité. Les traces représentées ici font 640 échantillons (cinq secondes).

Les tracés des sources sont propres à chaque session et comme on peut le voir sur la **Figure 4.11**, on observe une réelle augmentation des phénomènes de synchronisation au cours du temps qui n'est pas due à des artefacts ou des erreurs de mesures (Voir **Annexe 6.10** pour les autres sessions). De plus la corrélation des deux sources filtrées entre 4 et 7Hz entre les deux pianistes du duo n°IV pour chaque session (2, 3, 4, 5 et 6) est de 0.05, 0.09, -0.1, 0.30 et -0.38 respectivement pour le premier trial, et de 0.006, -0.15, -0.1, 0.36 et -0.33 respectivement pour le second trial.



**Figure 4.11** Trace des sources non filtrées, filtrées entre 4-7Hz et de la cohérence du duo n°IV dans les sessions 2 et 6 en condition duo.

Un échantillon représentatif des traces des sources du duo n°IV. La partie supérieure correspond aux sources non filtrées des pianistes leader follower. La partie du milieu correspond aux sources filtrées entre 4 et 7 Hz. Enfin, le tracé inférieur est la cohérence calculée au cours du temps sur des fenêtres de 1 échantillon sur 128 échantillons (une seconde). Les traits verts verticaux illustrent des occurrences de synchronisation choisies arbitrairement. Les traces représentées ici font 640 échantillons (cinq secondes).

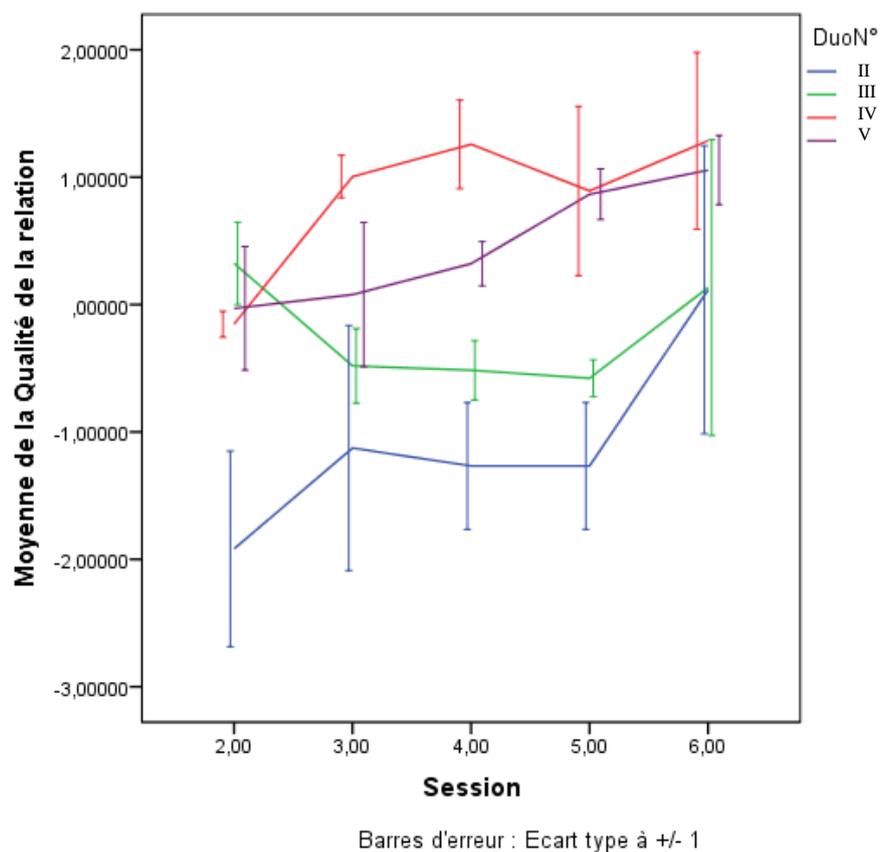
On pourrait émettre l'hypothèse que ces synchronisations exceptionnelles pourraient être liées à des mouvements oculaires. En effet, il est très difficile de complètement éliminer l'influence de ces mouvements dans les signaux enregistrés en EEG bien qu'une inspection visuelle a été effectuée pour en retirer un maximum lors des analyses. Cependant, le fait que les sources estimées se trouvent au niveau du cortex moteur et pariétal, des zones spatialement éloignées du cortex orbitofrontal, nous invite à rejeter cette explication.

Les résultats finaux de corrélation positive entre les variables performance musicale, qualité de la relation et la cohérence, répondent à notre hypothèse principale qui supporte l'existence d'une base neuronale de l'interaction sociale : les réseaux impliqués évoluent, se raffinent, au cours du temps et de l'apprentissage de la tâche et/ou de la relation. Il nous reste à clarifier s'il s'agit de la performance en elle-même d'un point de vue tâche mécanique ou de la relation émotionnelle qui possède le plus d'impact. Pour déterminer cet effet, examinons la localisation des sources d'intérêt que nous avons isolée grâce à la jBSS. Notre analyse porte sur le couple IV spécifiquement dû au fait que, par rapport à tous les autres duos, ce sont ceux qui ont présenté la meilleure performance finale (16/20), avaient la meilleure entente autant au niveau mesure (qualité de la relation) que lors des interactions pendant les expériences, et qu'ils se sont vus le plus souvent pour s'entraîner et en dehors du contexte de l'expérience. La source du pianiste-leader que nous avons sélectionnée chez eux est située au niveau du cortex prémoteur gauche (BA6) à travers toutes les sessions alors que celle du pianiste-follower est localisée au niveau de l'aire motrice primaire (BA4) et l'aire prémotrice lors des premières sessions (deux à trois) et glisse vers le cortex pariétal postérieur (BA7 et BA5) dans les dernières sessions (quatre à six) (**Figure 4.6**). Le cortex prémoteur est associé à la programmation de mouvements complexes, la compréhension des actions d'autrui et le monitoring de ses propres mouvements (Halsband et al., 1993; Rizzolatti et al., 1996). Le fait que la source soit plutôt localisée à gauche peut avoir un rapport avec le fait que le pianiste-leader dédie une attention particulière aux mouvements de sa main droite, celle qui est au plus proche de son partenaire et avec lequel il partage certaines touches du clavier. La source du pianiste-follower est associée au cortex moteur primaire dans les premières sessions, aire cérébrale du contrôle de l'exécution du mouvement et de la génération de son signal (Kakei et al., 1999). Cependant il n'existe aucune différence de cohérence entre ces sources lors des différences conditions expérimentales et contrôles que ce soit au niveau des analyses de groupe ou du duo n°IV. La différence, fortement significative pour ce duo, et marginale pour le groupe, réside dans les deux dernières sessions. La source associée du pianiste-follower se trouve au niveau du cortex prémoteur (BA6) pour la session 5, c'est-à-dire la même zone que le pianiste-leader, et le cortex pariétal postérieur (BA5 et BA7) pour la session 6, des zones

associées à la production et la planification de mouvements en intégrant les informations provenant du système visuel, somatosensoriel et auditif (Buccino et al., 2001; Lacquaniti et al., 1995; Sadato et al., 1996; Sakata et al., 1973). Ces indices nous indiquent que l'augmentation de cohérence et la différence significative dans la bande de fréquence theta (4-7 Hz) lors des deux dernières sessions sont associées à des processus moteur chez les deux pianistes. Cette interprétation est cohérente avec l'augmentation de la performance musicale au cours du temps qui repose en grande partie sur la capacité à coordonner ses gestes avec son partenaire en fonction du rythme. Cependant, le fait qu'il n'existe pas de différence significative de cohérence entre la condition Duo et Solo-Leader alors qu'elle existe lorsque l'on compare Duo et Solo-Follower nous interpelle. Rappelons que le pianiste qui joue est la seule différence expérimentale entre les deux conditions de Solo, dans les deux cas le partenaire est toujours présent à ses côtés sans toucher au clavier et écoute son collègue jouer avec l'enregistrement audio. Comme nous l'avons écrit plus haut, il existe une différence de rôle dans la performance des deux pianistes : le pianiste-leader s'occupe de donner le rythme et le pianiste-follower le suit en jouant la mélodie. C'est dans cette distinction que réside la différence de cohérence calculée. En effet, la condition Solo-Leader laisse le pianiste leader "choisir" son tempo, bien que la tâche soit d'essayer de jouer au mieux avec l'enregistrement. Pendant ce temps-là, le pianiste-follower l'écoute, et il est possible qu'il se mette volontairement ou non dans la situation mentale de vouloir le "suivre" et jouer la mélodie. Effectivement, ce cas peut s'apparenter à l'imagerie motrice dans laquelle il est possible d'avoir une implication non triviale des circuits cérébraux requis pour réaliser, voir même percevoir l'action dans le cas de la musique (Hauelsen & Knösche, 2001; Jeannerod, 1995; Zatorre et al., 2007). On devrait retrouver le même résultat de cohérence dans la condition Solo-follower, ce qui n'est pas le cas. En effet, le pianiste-leader ne choisit pas directement le tempo dans la condition Solo-follower, mais l'a choisi précédemment lorsqu'il a enregistré sa partie. Ainsi le pianiste-follower suit le rythme de l'enregistrement audio et non pas le rythme imaginé par son partenaire à ses côtés, d'où une cohérence calculée sur les sources motrices significativement plus faible que dans les deux autres conditions.

Bien que nous n'ayons pas retenu ici de sources cérébrales associées à des processus affectifs, d'interaction sociale ou d'empathie dû à nos critères de sélection (i.e., cortex orbitofrontal et jonction temporo-pariétale droite) (Bechara et al., 2000; Blood & Zatorre, 2001; Lombardo et al., 2011; Saxe & Kanwisher, 2003), nous pensons malgré tout que le facteur émotionnel a un rôle significatif dans les présents résultats. L'examen des données comportementales et les entretiens post-expérience nous ont montré qu'il existe un duo différent des autres (duo n°IV). En effet, la dynamique de leur relation était notable en plusieurs points : ils se voyaient régulièrement pour travailler le morceau de musique (une fois par semaine), aussi en dehors de ce contexte (deux fois

par semaine), leur composante de qualité de la relation est la plus élevée et est celle qui a augmenté le plus rapidement de tous les groupes (**Figure 4.12**). Par ailleurs, ils ont continué à se voir régulièrement après l'expérience et ont participé à un événement à la faculté de musicologie où ils ont joué leur morceau de piano à quatre mains. Ce sont ceux qui ont montré la plus grande motivation et assiduité dans la tâche expérimentale et ceux qui s'entendaient le mieux. Le score de cohérence calculé chez eux était très élevé par rapport aux autres ( $\sim 0.4$  vs  $\sim 0.1$ ), avec une différence très significative ( $p_{\text{combiné}} < 0.001$ ) entre les conditions expérimentales et contrôles, et la performance musicale finale était la meilleure de tous les groupes (note de 16/20). Bien que nous ne puissions affirmer que la qualité de la relation soit responsable de leurs différences par rapport au reste de notre échantillon, nous pensons qu'elle a eu un rôle important à jouer dans leur motivation à travailler pour l'expérience et à réaliser une performance exemplaire.



**Figure 4.12 Moyenne de la composante de la Qualité de la relation en fonction des sessions et selon le duo.**  
On remarque que de façon générale, la Qualité de la relation augmente au cours des sessions. Par ailleurs, le duo n°IV possède le plus haut score de ce facteur et a augmenté rapidement dès la session 2 vers un plateau.

En effet, notre population comportait un Duo qui possédait un passif émotionnel négatif et nous avons préféré l'exclure de notre analyse de groupe (duo n°1); mais malgré tout il s'agit là de données très intéressantes obtenues de façon complètement fortuites. En effet, leur performance

musicale fait partie des moins bonnes (note de 13/20), même si elle augmente tout de même au cours du temps. Nous ne les avons pas inclus dans l'analyse en composante principale des variables comportementales, donc nous ne pouvons parler de la composante de qualité de la relation, mais l'exploration des données comportementales nous apprend que leur variable de proximité décroît au cours du temps, une tendance opposée à la tendance générale, et qu'ils avaient le plus de difficultés de communication que tous les autres (en moyenne de 3.7 pour le duo par rapport à 5.7, sur une échelle de 1 à 7). Ils ne se sont pas vus pour travailler ensemble le morceau de musique et ne se sont pas rencontrés en dehors de ce contexte. Ces données, bien qu'elles soient un cas particulier, contrastées par rapport à celles du Duo n°IV nous orientent vers le fait que le facteur émotionnel de la dynamique de la relation doit certainement avoir un rôle modulateur. Pour explorer cette hypothèse, il serait intéressant de réutiliser notre protocole expérimental en comparant des amis se connaissant depuis longtemps avec des inconnus qui travailleront pour la première fois ensemble, à défaut d'obliger des personnes se détestant à interagir pour des raisons éthiques évidentes.

### **Design expérimental et population**

Le design expérimental pour lequel nous avons opté met clairement en avant l'aspect écologique pour étudier l'interaction sociale. La difficulté majeure de ce type d'étude est de trouver en contrepartie un contrôle expérimental suffisant prenant en compte l'authenticité de l'interaction. Dans notre cas, le facteur le plus limitant était la modalité d'imagerie (EEG) et sa sensibilité aux mouvements oculaires et musculaires. Afin de réduire ce type d'influence nous avons pris le temps de montrer aux participants ce qu'étaient des artefacts et quel contrôle ils pouvaient avoir dessus. De plus, pour soulager la fatigue due à la posture et limiter les mouvements de la tête par rapport aux épaules, nous avons invité les pianistes à enfiler des colliers cervicaux (**Figure 4.13**). Ces dispositifs pouvaient perturber le jeu des participants et il a fallu une session complète d'enregistrement (que nous avons exclue des analyses) pour que tous les groupes s'y habituent et soient capables de jouer sans trop cligner des yeux et/ou bouger afin d'obtenir des signaux EEG exploitables. Pour des futures expériences nous conseillons d'inclure une session dédiée à l'explication du contexte expérimental avec enregistrements EEG et débriefing sur les données acquises.



**Figure 4.13 Photographie du protocole expérimental lors de la réalisation d'un morceau à quatre mains**

Le pianiste leader (à gauche) s'occupe de la partie basse du morceau ainsi que du rythme, tandis que le pianiste follower (à droite) joue la partie haute avec la mélodie. Chaque pianiste est équipé d'un casque EEG de 32 électrodes actives ainsi que d'un collier cervical pour éviter trop grandes contractions du cou. En face, se trouve le dispositif d'acquisition audio permettant d'enregistrer leur performance musicale. Les enceintes et amplificateur permettent de diffuser la performance solo dans les conditions contrôles.

En ce qui concerne le choix de la condition contrôle, nous voulions essayer de rester le plus proche possible de la condition expérimentale, donc inclure la présence du partenaire et celle d'un stimulus auditif pertinent, tout en prenant en compte le fait qu'il n'y ait pas besoin de réelle coordination motrice puisque nous avons un enregistrement audio et que le partenaire ne jouait pas. Etant donné qu'il y avait deux pianistes nous étions obligé d'avoir deux conditions contrôles ce qui injecta un contraste supplémentaire imprévu, que nous avons détecté dans nos résultats, dû à la différence de rôle entre les participants. Cet effet aurait disparu si nous avions fourni un casque insonorisant au partenaire ne faisant rien de manière à ce qu'il ne soit pas stimulé par la performance musicale et/ou la respiration de l'autre pianiste. Par ailleurs, il aurait fallu aussi qu'il ferme les yeux de manière à ne pas voir les mains de son collègue, ou alors qu'il regarde un point fixe loin du clavier.

Les questionnaires que les pianistes ont rempli nous ont révélés qu'ils possédaient un niveau moyen d'empathie par rapport à la population que ce soit pour le CBS ou le CEC, mais qu'ils étaient dans l'ensemble plus sensible à la contagion émotionnelle et, paradoxalement, avaient suffisamment de ressources cognitives pour se couper de ce genre de phénomène. De façon générale, les participants ont trouvé la tâche plaisante, bien qu'ils aient à l'unanimité reporté que la condition contrôle était difficile et inhabituelle car il était dur de "comprendre l'autre" lors de l'écoute d'un

enregistrement audio. Le fait d'éviter de trop bouger ou de cligner des yeux les a tous perturbé, mais ils trouvèrent que cela les obligeait à plus se concentrer et mémoriser la position des touches du piano sans utiliser le regard. Aussi, après entretien post-expérience, ils estimèrent que l'activité n'était pas si éloignée de ce qu'ils auraient pu accomplir dans la "vraie vie" et que globalement l'expérience était enrichissante d'un point de vue technique et personnel.

Enfin, l'ambition de cette expérience a dû s'accommoder des ressources limitées qui étaient à notre disposition. En effet elle a été réalisée avec cinq duos (n = 10 pianistes) ce qui est un petit échantillon. C'est un point important car il existait une très grande variabilité dans la dynamique d'interaction sociale et émotionnelle dans notre échantillon. Cependant, le fait que nous ayons adopté un design longitudinal sur six sessions pendant deux mois augmente le nombre de relevés expérimentaux ce qui en fait une expérience lourde (deux trials sur trois conditions expérimentales enregistrés sur cinq duos pendant six sessions, pour un total de 180 enregistrements en hyperscanning-EEG). De nature, les données en hyperscanning requièrent un grand nombre de ressources expérimentales pour l'analyse et l'interprétation, et elles en demandent davantage lors d'un design longitudinal. D'autre part, nous avons privilégié le niveau d'expertise de piano dans la formation des duos, ceux-ci étaient parfois mixtes ou non, ce qui a pu rajouter de la variabilité au sein de nos données (pour information le duo n°IV était composé d'un homme et d'une femme). Par ailleurs, augmenter la durée d'apprentissage aurait pu aussi être bénéfique pour tous les groupes. Effectivement, nous avons vu que le duo n°IV a atteint rapidement une bonne performance et peut-être cela aurait été aussi le cas pour les autres duos s'ils avaient bénéficié de plus de temps (i.e., quatre mois).

## **Méthode et analyses**

L'ensemble de nos analyses est basé sur les matrices cospectrales des signaux EEG sur lesquelles nous avons estimé nos sources (Congedo et al., 2008). Or, il se trouve que les statistiques de second-ordre pourraient ne pas être capables d'extraire toute l'information pertinente de nos signaux, que ce soit sur les analyses au sein d'un même sujet ou sur les deux conjointement. Il pourrait aussi être intéressant d'utiliser d'autres mesures de couplage (Chapitre 3.II.a) reposant sur d'autres types de statistiques (e.g., Multivariate Autoregressive Model (MVAR) : Astolfi et al. (2010)), ou d'autres modalités d'imagerie (e.g., NIRS : Scholkmann et al. (2013)) afin de disposer d'un plus grand éventail de possibilités.

La séparation de sources présente l'avantage certain de se retrouver dans un espace qui possède une signification anatomique. Cependant, il est aussi possible que l'utilisation de tels

algorithmes ne permette pas de révéler les phénomènes d'intérêt éphémères et très courts pour les processus entrant en jeu dans l'interaction sociale (Friston, 2000; Hari & Kujala, 2009). Par ailleurs, nous nous sommes limités à des mesures de couplage examinant la synchronisation au niveau d'une même bande de fréquence, mais il est possible que différentes sources soient liées ensemble à différentes fréquences (i.e., couplage cross-frequence : Jensen & Colgin (2007); Jirsa & Müller (2013); Müller & Lindenberger, (2014)). Il serait intéressant d'examiner cette voie en empruntant de tels outils, peut-être révéleront-ils les sources concernées malgré leur fragilité. De plus, nous n'avons pas réalisé d'analyse dans le domaine des capteurs (i.e., calcul de la synchronie par cluster d'électrode ou capteur par capteur) comme cela s'est souvent fait dans la littérature en hyperscanning-EEG (Babiloni et al., 2012; Kawasaki et al., 2013; Konvalinka et al., 2014; Müller et al., 2013). Cette démarche, bien que moins puissante que l'analyse dans l'espace des sources, pourrait être bénéfique car elle pourrait, d'une part, éventuellement renforcer nos résultats, et d'autre part, nous permettre de les comparer plus directement aux autres études.

Enfin, parce que nous devons choisir une méthode dans la limite de temps qui nous était accordée, nous n'avons pas emprunté d'autres classes d'outils pour comprendre la dynamique des signaux cérébraux. Par exemple, ceux issus de la théorie des graphes (Bullmore & Sporns, 2009) auraient pu nous permettre de caractériser l'architecture fonctionnelle de nos réseaux intra- et inter-cérébraux (Müller & Lindenberger, 2014) et d'en observer l'évolution au cours du temps.

## V. Conclusion

Ce chapitre décrit notre contribution expérimentale dans le domaine de l'hyperscanning. A notre connaissance, notre étude est la première à examiner la dynamique de l'interaction sociale au cours du temps, d'un point de vue comportemental et analyse des signaux cérébraux, en utilisant le paradigme de la performance musicale et la méthode jBSS. Dans un premier temps, nous avons expliqué pourquoi nous avons choisi ces outils et ce contexte expérimental, puis avons rappelé quels étaient nos objectifs. En second lieu, nous avons présenté l'expérience en décrivant sa conception, puis avons détaillé les résultats comportementaux et physiologiques. Nous avons mis en évidence qu'il existait une augmentation de la performance musicale au cours du temps et que celle-ci était corrélée positivement avec un index de synchronisation cérébrale inter-sujet et la qualité de la relation des pianistes. Nous avons ensuite discuté de l'origine fronto-pariétale des sources estimées et du fait que le facteur émotionnel de la relation des pianistes pouvait potentiellement jouer sur leur implication dans la tâche et moduler leur performance. Enfin, nous avons émis plusieurs

hypothèses pour expliquer nos résultats et proposer de nouvelles lignes de recherche si à l'avenir de futures expériences se voyaient emprunter le même paradigme expérimental.

## **Chapitre V. Conclusion générale et perspectives**



# Conclusion et perspectives

---

## I. Discussion générale

Les interactions sociales sont la base de la société humaine, que ce soit à un niveau individuel entre deux personnes apprenant à se connaître, ou au niveau de toute une population dans l'émergence d'une civilisation. L'étude de ces phénomènes complexes et dynamique a été le sujet de la psychologie sociale et de la sociologie depuis des décennies (Le Bon, 1900; McDougall, 2003; Milgram & Van den Haag, 1978; Tarde, 1895). Récemment, grâce aux progrès techniques en neurosciences, les scientifiques se sont donnés pour objectif de mettre en évidence les structures et réseaux neuronaux sous-jacents des interactions humaines, donnant naissance à la discipline des neurosciences sociales. Une nouvelle discipline nécessite de nouvelles techniques d'étude et de nouveaux outils d'analyses, et c'est dans ce contexte de tournant paradigmatique que nos travaux s'inscrivent (Di Paolo & De Jaegher, 2012; Dumas, 2011; Hari & Kujala, 2009; Hari et al., 2015; Schilbach et al., 2012; Sebanz et al., 2006).

Nous avons réalisé assez tôt dans la thèse que certains ingrédients étaient cruciaux pour étudier l'être humain en situation sociale. En effet, nous avons vu dans le Chapitre I qu'il existait plusieurs types d'interaction (e.g., observation, tour-à-tour, continue) permettant chacune d'examiner un aspect différent de la relation humaine. Notre choix s'est porté sur l'interaction continue étant donné que, sur un critère de validité écologique, nous considérons qu'elle représentait au mieux une interaction véritable présente dans la vie quotidienne. La composante émotionnelle était aussi un aspect important de notre design qui permettait d'une part, d'engager les participants dans l'expérience (e.g., "readiness to interact" de Di Paolo & De Jaegher (2012)), et d'autre part d'en augmenter la validité écologique. Enfin, notre contribution originale a été de vouloir introduire une notion temporelle dans l'apprentissage de la tâche et de la relation interpersonnelle. Cette volonté a été motivée par le désir d'examiner l'apparition et l'évolution de la synchronisation des réseaux cérébraux en plus d'offrir une opportunité aux pianistes d'interagir ensemble sur un construit social qui ne disparaîtrait pas à la sortie du box expérimental. Ainsi, la

conception de notre expérience n'a été réalisable que grâce à l'examen de la littérature en hyperscanning effectuée dans le Chapitre I. Il est intéressant de noter que nous avons été dans la mesure de retrouver le réseau neuronal intersujet sur la bande de fréquence theta (5-6 Hz) que nous avons décrit dans cette partie, en plus de mettre en évidence une asymétrie entre les sources des deux pianistes qui serait fonction du rôle (Konvalinka et al., 2014). De plus, les sources retenues selon nos critères de sélection font parties du MNS (Chapitre I, Section I) : elles se situent au niveau du cortex prémoteur dorsal et du lobe pariétal supérieur. Cette constatation renforce notre hypothèse quant à l'implication de ces sources dans les processus cérébraux sous-tendant l'interaction sociale.

Nous avons déduit dans le Chapitre II que la performance musicale remplissait nos critères de sélection en tant qu'activité expérimentale. Cette partie nous a permis de mieux comprendre cette discipline d'un point de vue des neurosciences et de son lien privilégié avec les émotions. Dans notre étude nous n'avons pas retenu de sources significatives au niveau des zones cérébrales ayant un lien avec l'émotion et la musique en partie parce que ces structures sont proches de sources d'artéfacts oculaires (i.e., cortex orbito-frontal), et sont profondes et difficiles d'accès avec l'EEG (i.e., amygdale, hypothalamus, hippocampe). Il serait intéressant de répliquer l'expérience en se focalisant sur ces structures en accordant une attention particulière aux problèmes d'artefacts et d'accès à l'information cérébrale, en utilisant une autre modalité de neuroimagerie en conjonction ou des méthodes de traitement de signal additionnelles.

Les sources cérébrales que nous avons estimées sont situées dans des structures impliquées dans la capacité motrice. Or, la musique est aussi intimement liée à cette compétence cognitive. En effet, le simple fait d'écouter une musique que l'on sait jouer activerait les neurones miroirs nous faisant penser, de façon consciente ou non, aux mouvements requis pour sa réalisation, induisant ainsi une activité cérébrale. L'inverse est bien entendu vrai. Aussi, frapper les touches à vide sur un piano débranché pour ne pas déranger les voisins de l'immeuble active nos zones auditives comme si nous entendions la musique se jouer (Zatorre et al., 2007). Dans une étude en IMRf, des musiciens devaient rester parfaitement immobiles en écoutant de la musique. Les régions responsables du mouvement (cervelet, ganglions de la base, aires motrices) étaient engagées comme s'il était impossible pour eux de s'empêcher de vouloir bouger (Levitin, 2008). D'autres structures ont un lien avec la musique et le mouvement : notamment les aires supplémentaires motrices, le cortex prémoteur dorsal, le cortex préfrontal dorsolatéral, le lobe inférieur pariétal sont réquisitionnées, par exemple, lors d'une tâche de tapping synchronisée au rythme d'une séquence musicale (Chen et al., 2008). Enfin, dans des études de perception visuelle lors de performances musicales, il a été mis

en évidence que le simple fait de regarder une performance sans le son met en jeu des structures cérébrales émotionnelles et perceptuelles (Davidson, 1993; Vines et al., 2005; Vines et al., 2006).

Par ailleurs, nous pensons qu'il aurait été intéressant d'analyser la performance musicale plus en profondeur. Par exemple, repérer des schémas musicaux dans des refrains, et essayer d'examiner s'il existe des patterns cérébraux qui leur sont particulièrement associés. Nous avons entamé de telles démarches en proposant l'hypothèse II.b du Chapitre IV (différence significative dans la synchronisation cérébrale lors des périodes de haute qualité musicale par rapport à une qualité normale), mais avons été dans l'impossibilité d'estimer des sources cohérentes avec la séparation de source conjointes (jBSS), principalement dû à un manque de données expérimentales.

Dans le Chapitre III nous avons introduit l'EEG, décrit différentes méthodes de calcul de couplage et abordé les outils de jBSS. Lors de la conception de l'expérience, nous avons déterminé que l'EEG était la modalité de neuroimagerie la plus adaptée à son caractère écologique. En effet, elle permet une certaine liberté de mouvement, est rapide et peu contraignante à employer, en plus de posséder une très bonne résolution temporelle. Cependant, la spectroscopie proche infrarouge (NIRS) est une autre modalité qui s'est avérée aussi adaptée dans la littérature au vu de l'explosion des designs l'employant (Cui et al., 2012; Dommer et al., 2012; Funane et al., 2011; Holper et al., 2012; Jiang et al., 2012; Osaka et al., 2015; Osaka et al., 2014). Au vu de sa popularité et de ses caractéristiques écologiques, nous pensons qu'il pourrait être intéressant de répliquer notre expérience avec la NIRS (en plus de le refaire avec l'EEG) de manière à confirmer nos résultats avec une autre modalité.

Nous avons emprunté des indices de synchronisation ne nécessitant pas de suppositions préalables sur le type de relation dans la synchronisation cérébrale (cohérence et Phase Locking Value), en accord avec nos hypothèses. Néanmoins, au vu de nos résultats ressemblant à ceux du groupe de Müller sur les duos de guitare et sur le baiser romantique (Müller & Lindenberger, 2014; Sängler et al., 2012, 2013), nous pensons qu'il serait bénéfique d'étendre nos analyses à des indices dirigés de couplage comme l'Integrative Coupling Index ou la Partial Directed Coherence.

La jBSS nous a permis de nous affranchir d'un certain nombre de problèmes inhérents à l'EEG (e.g., résolution spatiale, artéfacts). Le fait de considérer que deux activités cérébrales issues de l'activité conjointe de deux sujets différents puissent être liées nous a invité à faire l'hypothèse que ces différents jeux de données (signaux EEG) possédaient un lien non trivial entre eux (interaction sociale). Cette injection d'a priori a fait de la jBSS un outil d'analyse particulièrement adapté car elle nous a permis d'exploiter une information additionnelle dans la séparation de source. Ainsi, utiliser un tel modèle nous a rapproché d'une réalité physiologique bénéfique pour l'interprétation des

résultats. Cependant, l'emploi d'une telle technique réduit aussi le champ des possibles de par les hypothèses sur lesquelles elle se base. Par exemple, le fait qu'elle suppose une dépendance de toutes les sources entre les jeux de données alors que de façon réaliste il ne doit exister que quelques sources couplées. Ou encore le fait que nous nous basons sur les statistiques de second ordre ; ainsi, nous faisons l'hypothèse que les sources d'intérêt ont un spectre unique, c'est-à-dire qu'il n'existe pas d'autres sources possédant un spectre proportionnel aux sources d'intérêt. Il serait également intéressant de considérer un couplage au travers de différentes bandes de fréquences ou de décalage dans le temps, afin de pouvoir capturer d'autres interactions complexes présentes dans le cerveau humain (Jensen & Colgin, 2007; Jirsa & Müller, 2013).

Dans ce manuscrit nous avons voulu contribuer expérimentalement au domaine des neurosciences sociales en examinant l'évolution d'une synchronisation cérébrale entre duos de pianistes lors de l'apprentissage d'un morceau de musique. Dans le Chapitre IV, nous avons mis en évidence une synchronisation cérébrale significative lors des dernières sessions d'enregistrement alors qu'elle était absente dans les premières. Cette augmentation du couplage cérébral, entre aires motrices du pianiste leader et aires pariétales du pianiste follower sur la bande de fréquence theta (5-6 Hz), était corrélée avec la performance musicale des musiciens et la qualité de leur relation. Nous avons découvert que ces résultats étaient essentiellement dus à l'un des duos de pianistes. Cependant, après un examen minutieux et systématique des données de ce groupe, nous avons pu écarter l'explication d'une synchronisation due à des artefacts biologiques ou à une erreur de calcul. Nous sommes aussi confiants que ce résultat n'est pas dû à une erreur de mesure (artefacts instrumentaux ou environnementaux), bien que nous ne puissions pas écarter cette hypothèse avec certitude. L'aspect éblouissant et unique de ces résultats nous invite à répliquer l'expérience avec un échantillon plus important sur une plus longue période de temps de manière à écarter significativement l'hypothèse d'une synchronisation fortuite ou d'une erreur non identifiée. Il serait aussi recommandable de contraster des musiciens se connaissant depuis longtemps avec des inconnus de manière à examiner si le couplage cérébral dépend plus du niveau de la qualité de la relation, ou plus de la performance mécanique de la tâche. Nous aurions voulu aussi explorer ces aspects dans notre expérience, cependant nous avons été limités d'un point de vue des ressources temporelles et budgétaires, ce qui a réduit notre échantillon de musiciens, ainsi que la durée sur laquelle nous les avons étudiés.

Chaque chapitre de ce manuscrit nous a permis d'architecturer, à notre connaissance, la première expérience longitudinale en neurosciences sociales employant l'hyperscanning. Même si

elle est exploratoire, cette étude nous encourage à aller plus loin dans l'exploration de l'interaction sociale grâce au paradigme de la performance musicale.

## II. Perspectives

Le courant des neurosciences sociales est en plein développement depuis une dizaine d'année. Nous sommes à une période charnière composée de découvertes méthodologiques (e.g., hyperscanning), de nouvelles méthodes d'analyses (e.g., jBSS) et de nouveaux designs expérimentaux adaptés aux neurosciences (e.g., étude de l'interaction sociale en situation écologique). En effet, au cours des dernières années, de nombreux scientifiques de différentes communautés (psychologie sociale et du développement : Schilbach et al. (2012) ; éducation : Thompson & Varela (2001) ; études des systèmes complexes et dynamiques : Kelso (2012) ; cognition sociale : Frith & Frith (2012); Hari et al. (2015)) ont conseillé de se concentrer sur les mécanismes mis en jeu lors d'une interaction sociale en situation, et non sur la réaction d'un individu isolé à des stimuli sociaux. Ainsi, nous pensons que l'essor de ce courant de pensée n'est pas un simple effet de mode car il permet de considérer l'être humain de façon plus complète, globale et proche de la réalité, c'est-à-dire un être humain avec sa propre mentalité et son corps en interaction avec son environnement. Même si ce courant de pensée se détache de la vision classique en neuroscience, nous pensons qu'il n'a pas pour vocation de la remplacer, mais plutôt de compléter l'étude complexe de l'Homme.

Un tel tournant s'accompagne de nouveaux appareils, et comme le soulignent Dumas et al. (2014), il existe maintenant de nombreuses manières d'enregistrer un individu dans son environnement grâce à la portabilité des équipements et leurs faibles coûts (Pinti et al., 2015). Les appareils électroniques portables, comme les smartphones de plus en plus répandus et puissants, sont capables d'enregistrer des signaux physiologiques ou électroencéphalographiques en temps réel, nous permettant de nous immiscer dans la vie "réelle" et de quitter le laboratoire. Ainsi, ces avancées permettront de concevoir de nouveaux protocoles expérimentaux plus écologiques, et d'étendre l'analyse des comportements et signaux à plusieurs participants simultanément. Par ailleurs, le caractère peu encombrant des capteurs physiologiques nous encourage à les utiliser en même temps de manière à récolter différentes informations complémentaires (e.g., rythme cardiaque (Konvalinka et al., 2011), respiration (Müller & Lindenberger, 2011), signaux cérébraux (Müller et al., 2013), réponse électrodermale (Chatel-Goldman et al., 2014)) sur les réactions des participants et de considérer l'interaction sociale de façon multimodale.

Ces perspectives matérielles nous engagent à considérer leur utilisation dans un contexte autre que la recherche. Ainsi, en interface cerveau-machine (BCI), l'information physiologique ou

électroencéphalographique de la coopération pourrait être utilisée de manière à déclencher certains événements (e.g., dans notre laboratoire, le jeu Brain Invaders (Congedo et al., 2011) peut utiliser cette information pour détruire des cibles), à monitorer certains état attentionnels chez un tuteur et un élève en lien avec la performance d'une tâche (Stone et al., 2014), ou voire même étudier la "compatibilité" innée entre deux personnes lors d'une interaction sociale. Toutes ces avancées techniques, méthodologiques et théoriques empruntées à diverses disciplines scientifiques pourraient, utilisées ensemble, nous aider à mieux comprendre d'un point de vue organique ce que veut réellement dire "être sur la même longueur d'onde".

### III. Note finale

La musique est une forme d'art primordial, à la fois ordinaire et mystérieuse. Elle est présente dans le quotidien d'un grand nombre d'individus de toutes sociétés, nous accompagnant lors des tâches les plus anodines, mais aussi dans les moments les plus intenses de notre existence. Evocatrice universelle d'émotions et génératrice de liens sociaux depuis l'aube de l'humanité, elle révèle notre personnalité profonde et nous lie aux autres par le corps et l'esprit. Sans que nous ne sachions toujours pourquoi, nos fréquences personnelles s'harmonisent, s'entrelacent et se défont, au rythme de nos vies :

*"Our hearts resonate at the same frequency as the earth and the universe. Therefore, we are all valuable instruments in the orchestration of the world and its harmony. We must always be aware of the vibrations we emit individually and collectively. Always be in command of your music. Only you can control and shape its tone. If life throws you a few bad notes or vibrations, don't let them interrupt or alter your song."*

– Suzy Kassem

# Références

- Adolphs, R. (2002). Neural systems for recognizing emotion. *Current Opinion in Neurobiology*, 12, 169–177. doi:10.1016/S0959-4388(02)00301-X
- Adolphs, R. (2002b). Recognizing emotion from facial expressions: psychological and neurological mechanisms. *Behavioral and Cognitive Neuroscience Reviews*, 1(1), 21–62.
- Adolphs, R. (2003). Cognitive neuroscience of human social behaviour. *Nature Reviews Neuroscience*, 4(March), 165–178. doi:10.1038/nrn1056
- Aftanas, L. I., & Golocheikine, S. A. (2001). Human anterior and frontal midline theta and lower alpha reflect emotionally positive state and internalized attention: high-resolution EEG investigation of meditation. *Neuroscience Letters*, 310(1), 57–60.
- Aglioti, S. M., Cesari, P., Romani, M., & Urgesi, C. (2008). Action anticipation and motor resonance in elite basketball players. *Nature Neuroscience*, 11(9), 1109–1116.
- Anders, S., Heinzle, J., Weiskopf, N., Ethofer, T., & Haynes, J. D. (2011). Flow of affective information between communicating brains. *NeuroImage*, 54(1), 439–446. doi:10.1016/j.neuroimage.2010.07.004
- Astolfi, L., Cincotti, F., Mattia, D., De Vico Fallani, F., Salinari, S., Vecchiato, G., ... others. (2010). Imaging the social brain: multi-subjects EEG recordings during the “Chicken’s game.” In *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010 Annual International Conference of the IEEE* (pp. 1734–1737).
- Astolfi, L., Toppi, J., Borghini, G., Vecchiato, G., Isabella, R., De Vico Fallani, F., ... Babiloni, F. (2011). Study of the functional hyperconnectivity between couples of pilots during flight simulation: An EEG hyperscanning study. *Conference Proceedings : ... Annual International . IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference, 2011*, 1–4. doi:10.1109/IEMBS.2011.6090654
- Astolfi, L., Toppi, J., Cincotti, F., Mattia, D., Salinari, S., De Vico Fallani, F., ... Babiloni, F. (2011). Methods for the EEG hyperscanning. Simultaneous recordings from multiple subjects during social interaction. *2011 8th International Symposium on Noninvasive Functional Source Imaging of the Brain and Heart and the 2011 8th International Conference on Bioelectromagnetism*, 5–8. doi:10.1109/NFSI.2011.5936807
- Astolfi, L., Toppi, J., Fallani, F. D. V., Vecchiato, G., Salinari, S., Mattia, D., ... Babiloni, F. (2010). Neuroelectrical hyperscanning measures simultaneous brain activity in humans. *Brain Topography*, 23(3), 243–256.
- Ayotte, J., Peretz, I., Rousseau, I., Bard, C., & Bojanowski, M. (2000). Patterns of music agnosia associated with middle cerebral artery infarcts. *Brain : A Journal of Neurology*, 123, 1926–38.
- 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), 105–16. doi:10.1016/j.neuroimage.2011.12.008

- Babiloni, F., Astolfi, L., Cincotti, F., Mattia, D., Tocci, A., Tarantino, A., ... De Vico Fallani, F. (2007). Cortical activity and connectivity of human brain during the prisoner's dilemma: an EEG hyperscanning study. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society.*, 2007, 4953–6. doi:10.1109/IEMBS.2007.4353452
- Babiloni, F., Cincotti, F., Mattia, D., Mattiocco, M., De Vico Fallani, F., Tocci, A., ... Astolfi, L. (2006). Hypermethods for EEG hyperscanning. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 1, 3666–9. doi:10.1109/IEMBS.2006.260754
- Baccalá, L. A. & Sameshima, K. (2001). Partial directed coherence: a new concept in neural structure determination. *Biological Cybernetics*, 84(6), 463–474. doi:10.1007/PL00007990
- Bachrach, A., Fontbonne, Y., Joufflineau, C., & Ulloa, J. L. (2015). Audience entrainment during live contemporary dance performance: physiological and cognitive measures. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9(May), 1–13. doi:10.3389/fnhum.2015.00179
- Balkwill, L.-L., Thompson, W., & Rie, M. (2004). Recognition of emotion in Japanese, Western, and Hindustani music by Japanese listeners. *Japanese ...*, 46(4), 337–349.
- Baron-Cohen, S., & Wheelwright, S. (2004). The empathy quotient: An investigation of adults with asperger syndrome or high functioning autism, and normal sex differences. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 34(2), 163–175. doi:10.1023/B:JADD.0000022607.19833.00
- Bechara, A., Damasio, H., & Damasio, A. R. (2000). Emotion, decision making and the orbitofrontal cortex. *Cerebral Cortex*, 10(3), 295–307.
- Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (2011). *Random data: analysis and measurement procedures* (Vol. 729). John Wiley & Sons.
- Berridge, K. C. (2000). Reward learning: Reinforcement, incentives, and expectations. *Psychology of Learning and Motivation*, 40, 223–278.
- Bhattacharya, J., Petsche, H., & Pereda, E. (2001). Long-range synchrony in the gamma band: role in music perception. *The Journal of Neuroscience : The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 21(16), 6329–37.
- Blood, A. J., & Zatorre, R. J. (2001). Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward and emotion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98(20), 11818–23. doi:10.1073/pnas.191355898
- Blood, A. J., Zatorre, R. J., Bermudez, P., & Evans, A. (1999). Emotional responses to pleasant and unpleasant music correlate with activity in paralimbic brain regions. *Nature Neuroscience*, 2(4).
- Bronfenbrenner, U. (1977). Toward an Experimental Ecology of Human Development. *American Psychologist*, 32(7), 513–531. doi:10.1037/0003-066X.32.7.513
- Brunswik, E. (1943). Organismic achievement and environmental probability. *Psychological Review*, 50(3), 255–272. doi:10.1037/h0060889

- Buccino, G., Binkofski, F., Fink, G. R., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., ... Freund, J. (2001). Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *European Journal of Neuroscience*, *13*, 400–404. doi:10.1046/j.1460-9568.2001.01385.x
- Bullmore, E., & Sporns, O. (2009). Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems. *Nature Reviews Neuroscience*, *10*(3), 186–198.
- Burgess, A. P. (2013). On the interpretation of synchronization in EEG hyperscanning studies: a cautionary note. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*(December), 881. doi:10.3389/fnhum.2013.00881
- Buzsáki, G. (2006). *Rhythms of the Brain*. Oxford University Press.
- Buzsáki, G., & Draguhn, A. (2004). Neuronal oscillations in cortical networks. *Science (New York, N.Y.)*, *304*(5679), 1926–1929. doi:10.1126/science.1099745
- Canolty, R. T., Edwards, E., Dalal, S. S., Soltani, M., Nagarajan, S. S., Kirsch, H. E., ... Knight, R. T. (2006). High gamma power is phase-locked to theta oscillations in human neocortex. *Science*, *313*(5793), 1626–1628.
- Carroll, J. (1998). Steven Pinker's cheesecake for the mind. *Philosophy and Literature*, *22*(2), 478–485.
- Chamorro-Premuzic, T., & Furnham, A. (2007). Personality and music: can traits explain how people use music in everyday life? *British Journal of Psychology (London, England : 1953)*, *98*(Pt 2), 175–85. doi:10.1348/000712606X111177
- Chan, A. S., Ho, Y.-C., & Cheung, M.-C. (1998). Music training improves verbal memory. *Nature*, *396*(6707), 128.
- Chatel-Goldman, J., Congedo, M., Jutten, C., & Schwartz, J.-L. (2014). Touch increases autonomic coupling between romantic partners. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, *8*(March), 95. doi:10.3389/fnbeh.2014.00095
- Chatel-Goldman, J., Congedo, M., & Phlypo, R. (2013). Joint BSS as a natural analysis framework for EEG-hyperscanning. *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings*, 1212–1216. doi:10.1109/ICASSP.2013.6637843
- Chatrian, G. E., Lettich, E., & Nelson, P. L. (1985). Ten percent electrode system for topographic studies of spontaneous and evoked EEG activities. *American Journal of EEG Technology*, *25*(2), 83–92.
- Chen, J. L., Penhune, V. B., & Zatorre, R. J. (2008). Moving on time: brain network for auditory-motor synchronization is modulated by rhythm complexity and musical training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *20*(2), 226–39. doi:10.1162/jocn.2008.20018
- Cheng, X., Li, X., & Hu, Y. (2015). Synchronous brain activity during cooperative exchange depends on gender of partner: A fNIRS-based hyperscanning study. *Human Brain Mapping*, *00*, n/a–n/a. doi:10.1002/hbm.22754
- Christov-Moore, L., Simpson, E. A., Coudé, G., Grigaityte, K., Iacoboni, M., & Ferrari, P. F. (2014). Empathy: Gender effects in brain and behavior. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *46*, 604–627.

- Comon, P., & Jutten, C. (2010). *Handbook of Blind Source Separation: Independent component analysis and applications*. Academic press.
- Congedo, M. (2006). Subspace projection filters for real-time brain electromagnetic imaging. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 53(8), 1624–1634.
- Congedo, M. (2013). EEG Source Analysis.
- Congedo, M., Gouy-pailler, C., & Jutten, C. (2008). On the blind source separation of human electroencephalogram by approximate joint diagonalization of second order statistics. *Clinical Neurophysiology*, 119(12), 2677–2686. doi:10.1016/j.clinph.2008.09.007
- Congedo, M., Goyat, M., Tarrin, N., Ionescu, G., Varnet, L., Rivet, B., ... Jutten, C. (2011). “Brain Invaders”: a prototype of an open-source P300-based video game working with the OpenVIBE platform. In *5th International Brain-Computer Interface Conference 2011 (BCI 2011)* (pp. 280–283).
- Congedo, M., Phlypo, R., & Chatel-Goldman, J. (2012). Orthogonal and non-orthogonal joint blind source separation in the least-squares sense. *European Signal Processing Conference*, 1885–1889.
- Cooper, G., & Meyer, L. B. (1963). *The rhythmic structure of music* (Vol. 118). University of Chicago Press.
- Cosmides, L., & Tooby, J. (1995). From function to structure: The role of evolutionary biology and computational theories in cognitive neuroscience.
- Cross, I., & Woodruff, G. E. (2009). Music as a communicative medium. *The Prehistory of Language*, 11, 77.
- Cui, X., Bray, S., Bryant, D. M., Glover, G. H., & Reiss, A. L. (2011). A quantitative comparison of NIRS and fMRI across multiple cognitive tasks. *Neuroimage*, 54(4), 2808-2821.
- 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), 2430–7. doi:10.1016/j.neuroimage.2011.09.003
- Daubechies, I. (1990). The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 36(5), 961–1005.
- D’Ausilio, A., Novembre, G., Fadiga, L., & Keller, P. E. (2015). What can music tell us about social interaction? *Trends in Cognitive Sciences*, 19(3), 111–114.
- Damasio, H., Grabowski, T., Frank, R., Galaburda, A. M., & Damasio, A. R. (1994). The return of Phineas Gage: clues about the brain from the skull of a famous patient. *Science*, 264(5162), 1102–1105.
- Davidson, J. W. (1993). Visual perception of performance manner in the movements of solo musicians. *Psychology of Music*, 21(2), 103–113.
- De Vignemont, F., & Singer, T. (2006). The empathic brain: how, when and why? *Trends in Cognitive Sciences*, 10(10), 435–441.
- Decety, J., Chaminade, T., Grèzes, J., & Meltzoff, a N. (2002). A PET exploration of the neural mechanisms involved in reciprocal imitation. *NeuroImage*, 15, 265–272. doi:10.1006/nimg.2001.0938

- Decety, J., & Lamm, C. (2006). Human empathy through the lens of social neuroscience. *TheScientificWorldJournal*, 6, 1146–1163. doi:10.1100/tsw.2006.221
- Delorme, A., Palmer, J., Onton, J., Oostenveld, R., & Makeig, S. (2012). Independent EEG sources are dipolar. *PloS One*, 7(2).
- Demos, A. P., Chaffin, R., Begosh, K. T., Daniels, J. R., & Marsh, K. L. (2012). Rocking to the beat: effects of music and partner's movements on spontaneous interpersonal coordination. *Journal of Experimental Psychology. General*, 141(1), 49–53. doi:10.1037/a0023843
- Di Paolo, E., & De Jaegher, H. (2012). The interactive brain hypothesis. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6(June), 163. doi:10.3389/fnhum.2012.00163
- Di Pietro, M., Laganaro, M., Leemann, B., & Schnider, A. (2004). Receptive amusia: temporal auditory processing deficit in a professional musician following a left temporo-parietal lesion. *Neuropsychologia*, 42(7), 868–77. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2003.12.004
- Dodel, S., Cohn, J., Mersmann, J., Luu, P., Forsythe, C., & Jirsa, V. (2011). Brain signatures of team performance. In *Foundations of Augmented Cognition. Directing the Future of Adaptive Systems* (pp. 288–297). Springer.
- Dolan, R. J. (2002). Emotion, cognition, and behavior. *Science*, 298(5596), 1191–1194.
- 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.
- Dowling, W. J. (1999). *The development of music perception and cognition*. Academic Press.
- Dumas, G. (2011). Towards a two-body neuroscience. *Communicative & Integrative Biology*, 4(3), 349–52. doi:10.4161/cib.4.3.15110
- Dumas, G., Laroche, J., & Lehmann, A. (2014). Your body, my body, our coupling moves our bodies. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. doi:10.3389/fnhum.2014.01004
- Dumas, G., Nadel, J., Soussignan, R., Martinerie, J., & Garnero, L. (2010). Inter-brain synchronization during social interaction. *PloS One*, 5(8), e12166. doi:10.1371/journal.pone.0012166
- Edgington, E., & Onghena, P. (2007). *Randomization tests*. CRC Press.
- Edgington, E. S. (1972). An additive method for combining probability values from independent experiments. *The Journal of Psychology*, 80(2), 351–363.
- Elbert, T., Pantev, C., Wienbruch, C., Rockstroh, B., & Taub, E. (1995). Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players. *Science (New York, N.Y.)*, 270(5234), 305–7.
- Eldar, E., Ganor, O., Admon, R., Bleich, A., & Hendler, T. (2007). Feeling the real world: limbic response to music depends on related content. *Cerebral Cortex*, 17(12), 2828–2840.
- Fallani, F. D. V., Nicosia, V., Sinatra, R., Astolfi, L., & Cincotti, F. (2010). Defecting or Not Defecting : How to “ Read ” Human Behavior during Cooperative Games by EEG Measurements, 5(12). doi:10.1371/journal.pone.0014187

- Favre, D., Joly, J., Reynaud, C., & Salvador, L. L. (2005). Empathie, contagion émotionnelle et coupure par rapport aux émotions. *Enfance*, *57*(4), 363–382.
- Favre, D., Joly, J., Reynaud, C., & Salvador, L.-L. (2009). Empathy, emotional contagion and splitting with emotions: validation of a test to locate and help pupils at risk. *European Review of Applied Psychology*, *59*(3), 211–227.
- Fecteau, J. H., & Munoz, D. P. (2006). Saliency, relevance, and firing: a priority map for target selection. *Trends in Cognitive Sciences*, *10*(8), 382–390.
- Feinberg, I., Koresko, R. L., & Heller, N. (1967). EEG sleep patterns as a function of normal and pathological aging in man. *Journal of Psychiatric Research*, *5*(2), 107–144.
- Fisher, R. A. (1925). *Statistical methods for research workers*. Genesis Publishing Pvt Ltd.
- Forgas, J. P. (2003). Affective influences on attitudes and judgments.
- Friston, K. J. (2000). The labile brain. I. Neuronal transients and nonlinear coupling. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *355*(1394), 215–236.
- Friston, K. J. (2011). Functional and effective connectivity: a review. *Brain Connectivity*, *1*(1), 13–36.
- Frith, C., & Frith, U. (2012). Mechanisms of social cognition. *Annual Review of Psychology*, *63*, 287–313. doi:10.1146
- Frith, S. (1996). Music and identity. *Questions of Cultural Identity*.
- 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), 77011.
- Gabrielsson, A., & Wik, S. L. (2003). Strong Experiences Related to Music: A descriptive System. *Musicae Scientiae*, *7*(2), 157–217.
- Gallagher, H. L., & Frith, C. D. (2003). Functional imaging of “theory of mind.” *Trends in Cognitive Sciences*, *7*(2), 77–83.
- Gamer, M., & Büchel, C. (2009). Amygdala activation predicts gaze toward fearful eyes. *The Journal of Neuroscience*, *29*(28), 9123–9126.
- Gaser, C., & Schlaug, G. (2003). Brain structures differ between musicians and non-musicians. *The Journal of Neuroscience : The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *23*(27), 9240–9245. doi:23/27/9240 [pii]
- Gazzaniga, M. S. (2008). *Human: The Science Behind What Makes Us Unique* (Ecco, New York).
- Gibson, J. J. (1966). The senses considered as perceptual systems.
- Giroladini, W., Pederzoli, L., Bilucaglia, M., Caini, P., Ferrini, A., Melloni, S., ... Tressoldi, P. (2015). EEG correlates of social interaction at distance. *F1000Research*, *4*57(124). doi:10.12688/f1000research.6755.1
- Gong, X., Wang, X., & Lin, Q. (2015). Generalized Non-Orthogonal Joint Diagonalization With LU Decomposition and Successive Rotations, *63*(5), 1322–1334.

- Grahn, J. a, & Brett, M. (2007). Rhythm and beat perception in motor areas of the brain. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(5), 893–906. doi:10.1162/jocn.2007.19.5.893
- Granger, C. W. J. (1969). Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 424–438.
- Hallam, S. (2010). The power of music: Its impact on the intellectual, social and personal development of children and young people. *International Journal of Music Education*, 28(3), 269-289.
- Halpern, A. R., Martin, J. S., & Reed, T. D. (2008). An ERP study of major-minor classification in melodies.
- Halsband, U., Ito, N., Tanji, J., & Freund, H.-J. (1993). The role of premotor cortex and the supplementary motor area in the temporal control of movement in man. *Brain*, 116(1), 243–266.
- Hari, R., Henriksson, L., Malinen, S., & Parkkonen, L. (2015). Centrality of Social Interaction in Human Brain Function. *Neuron*, 88(1), 181–193.
- Hari, R., & Kujala, M. (2009). Brain basis of human social interaction: from concepts to brain imaging. *Physiological Reviews*, 453–479. doi:10.1152/physrev.00041.2007.
- Hari, R., & Parkkonen, L. (2015). The brain timewise : how timing shapes and supports brain function.
- Harris, P. L., Johnson, C. N., Hutton, D., Andrews, G., & Cooke, T. (1989). Young children’s theory of mind and emotion. *Cognition & Emotion*, 3(4), 379–400.
- Haselton, M., & Miller, G. (2006). Women’s fertility across the cycle increases the short-term attractiveness of creative intelligence. *Human Nature*, 1161(505).
- Hasson, U., Furman, O., Clark, D., Dudai, Y., & Davachi, L. (2008). Enhanced intersubject correlations during movie viewing correlate with successful episodic encoding. *Neuron*, 57(3), 452–462. doi:10.1016/j.neuron.2007.12.009.
- Hasson, U., Ghazanfar, A. a., Galantucci, B., Garrod, S., & Keysers, C. (2012). Brain-to-brain coupling: a mechanism for creating and sharing a social world. *Trends in Cognitive Sciences*, 1–8. doi:10.1016/j.tics.2011.12.007
- Hasson, U., Nir, Y., Levy, I., Fuhrmann, G., & Malach, R. (2004a). Intersubject synchronization of cortical activity during natural vision. *Science*, 303(MARCH), 1634–1640.
- Hauelsen, J., & Knösche, T. R. (2001). Involuntary motor activity in pianists evoked by music perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(6), 786–92. doi:10.1162/08989290152541449
- Hauser, M. D., & McDermott, J. (2003). The evolution of the music faculty: A comparative perspective. *Nature Neuroscience*, 6(7), 663–668.
- Haxby, J. V, Hoffman, E. A., & Gobbini, M. I. (2000). The distributed human neural system for face perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(6), 223–233.
- Henckens, M. J. a G., Hermans, E. J., Pu, Z., Joëls, M., & Fernández, G. (2009). Stressed memories: how acute stress affects memory formation in humans. *The Journal of Neuroscience : The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 29(32), 10111–10119. doi:10.1523/JNEUROSCI.1184-09.2009

- Hilgetag, C. C., & Hütt, M.-T. (2014). Hierarchical modular brain connectivity is a stretch for criticality. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(3), 114–115.
- Holper, L., Scholkmann, F., & Wolf, M. (2012). Between-brain connectivity during imitation measured by fNIRS. *Neuroimage*, 63(1), 212–222.
- Horwitz, B. (2003). The elusive concept of brain connectivity. *Neuroimage*, 19(2), 466–470.
- Hotelling, H. (1936). Relations between two sets of variates. *Biometrika*, 321–377.
- Hund-Georgiadis, M., & von Cramon, D. Y. (1999). Motor-learning-related changes in piano players and non-musicians revealed by functional magnetic-resonance signals. *Experimental Brain Research*, 125(4), 417–25.
- Hunt, A. M. (2015). Boundaries and Potentials of Traditional and Alternative Neuroscience Research Methods in Music Therapy.
- Hyde, K. L., Lerch, J., Norton, A., Forgeard, M., Winner, E., Evans, A. C., & Schlaug, G. (2009). Musical training shapes structural brain development. *The Journal of Neuroscience : The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 29(10), 3019–25. doi:10.1523/JNEUROSCI.5118-08.2009
- Jarvis, E. (2004). Learned birdsong and the neurobiology of human language. *Annals of the New York Academy of Sciences*.
- Jäncke, L. (2008). Music, memory and emotion. *Journal of Biology*, 7(6), 21. doi:10.1186/jbiol82
- Jeannerod, M. (1995). Mental imagery in the motor context. *Neuropsychologia*, 33(11), 1419–1432.
- Jensen, O., & Colgin, L. L. (2007). Cross-frequency coupling between neuronal oscillations. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(7), 267–269.
- Jiang, J., Dai, B., Peng, D., Zhu, C., Liu, L., & Lu, C. (2012). Neural Synchronization during Face-to-Face Communication. *Journal of Neuroscience*, 32(45), 16064–16069. doi:10.1523/JNEUROSCI.2926-12.2012
- Jirsa, V., & Müller, V. (2013). Cross-frequency coupling in real and virtual brain networks. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 7.
- Jordan, J. S. (2009). Forward-looking aspects of perception–action coupling as a basis for embodied communication. *Discourse Processes*, 46(2-3), 127–144.
- Juslin, P. N., & Sloboda, J. A. (2001). *Music and emotion: Theory and research*. Oxford University Press.
- Takei, S., Hoffman, D. S., & Strick, P. L. (1999). Muscle and movement representations in the primary motor cortex. *Science*, 285(5436), 2136–2139.
- Kauppi, J.-P., Jääskeläinen, I. P., Sams, M., & Tohka, J. (2010). Inter-subject correlation of brain hemodynamic responses during watching a movie: localization in space and frequency. *Frontiers in Neuroinformatics*, 4(March), 5. doi:10.3389/fninf.2010.00005
- Kawasaki, M., Yamada, Y., Ushiku, Y., Miyauchi, E., & Yamaguchi, Y. (2013). Inter-brain synchronization during coordination of speech rhythm in human-to-human social interaction. *Scientific Reports*, 3, 1692. doi:10.1038/srep01692

- Kelley, A. E., & Berridge, K. C. (2002). The neuroscience of natural rewards: relevance to addictive drugs. *The Journal of Neuroscience*, *22*(9), 3306–3311.
- Kelso, J. a S. (2012). Multistability and metastability: understanding dynamic coordination in the brain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, *367*(1591), 906–18. doi:10.1098/rstb.2011.0351
- Kilner, J. M., & Friston, K. J. (2014). Relating the “mirroriness” of mirror neurons to their origins. *Behavioral and Brain Sciences*, *37*(02), 207–208.
- King-Casas, B., Tomlin, D., Anen, C., Camerer, C. F., Quartz, S. R., & Montague, P. R. (2005). Getting to know you: reputation and trust in a two-person economic exchange. *Science (New York, N.Y.)*, *308*(5718), 78–83. doi:10.1126/science.1108062
- Kirwan, P. (2007). The Oxford Dictionary of Music (Revised 2nd edition). *Reference Reviews*, *21*(2), 58.
- Klimesch, W., Doppelmayr, M., Russegger, H., Pachinger, T., & Schwaiger, J. (1998). Induced alpha band power changes in the human EEG and attention. *Neuroscience Letters*, *244*(2), 73–76.
- Koelsch, S. (2014). Brain correlates of music-evoked emotions. *Nature Reviews Neuroscience*, *15*(3), 170–180.
- Koelsch, S., Fritz, T., V Cramon, D. Y., Müller, K., & Friederici, A. D. (2006). Investigating emotion with music: an fMRI study. *Human Brain Mapping*, *27*(3), 239–50. doi:10.1002/hbm.20180
- Koelsch, S., Gunter, T., Friederici, a D., & Schröger, E. (2000). Brain indices of music processing: “nonmusicians” are musical. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *12*(3), 520–41.
- Koike, T., Tanabe, H. C., & Sadato, N. (2015). Hyperscanning neuroimaging technique to reveal the “two-in-one” system in social interactions. *Neuroscience research*, *90*, 25-32.
- 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. doi:10.1016/j.neuroimage.2014.03.003
- Konvalinka, I., & Roepstorff, A. (2012). The two-brain approach: how can mutually interacting brains teach us something about social interaction? *Frontiers in Human Neuroscience*, *6*(July), 215. doi:10.3389/fnhum.2012.00215
- Konvalinka, I., Xygalatas, D., Bulbulia, J., Schjødt, U., Jegindø, E.-M., Wallot, S., ... Roepstorff, A. (2011). Synchronized arousal between performers and related spectators in a fire-walking ritual. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(20), 8514–8519.
- Krill, A. L., & Platek, S. M. (2012). Working together may be better: Activation of reward centers during a cooperative maze task. *PLoS ONE*, *7*(2), 1–7. doi:10.1371/journal.pone.0030613
- Krings, T., Töpper, R., Foltys, H., Erberich, S., Sparing, R., Willmes, K., & Thron, a. (2000). Cortical activation patterns during complex motor tasks in piano players and control subjects. A functional magnetic resonance imaging study. *Neuroscience Letters*, *278*(3), 189–93.

- Krumhansl, C. (1997). An exploratory study of musical emotions and psychophysiology. *Canadian Journal of Experimental Psychology = Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, 51(4), 336–53.
- Krumhansl, C. (2000). Rhythm and pitch in music cognition. *Psychological Bulletin*.
- Lachaux, J., Rodriguez, E., Martinerie, J., & Varela, F. J. (1999). Measuring Phase Synchrony in Brain Signals, 208, 194–208.
- Lacquaniti, F., Guigon, E., Bianchi, L., Ferraina, S., & Caminiti, R. (1995). Representing spatial information for limb movement: role of area 5 in the monkey. *Cerebral Cortex (New York, N.Y. : 1991)*, 5(5), 391–409. doi:10.1093/cercor/5.5.391
- Lamm, C., Decety, J., & Singer, T. (2011). Meta-analytic evidence for common and distinct neural networks associated with directly experienced pain and empathy for pain. *Neuroimage*, 54(3), 2492–2502.
- Le Bon, G. (1900). *Psychologie des foules*. F. Alcan.
- Lee, R. F. (2015). Dual Logic and Cerebral Coordinates for Reciprocal Interaction in Eye Contact, 1–23. doi:10.15154/1170165.
- Leppänen, J. M., & Nelson, C. A. (2009). Tuning the developing brain to social signals of emotions. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(1), 37–47.
- Levitin, D. J. (2006). This is your brain on music.
- Levitin, D. J. (2008). *The world in six songs: How the musical brain created human nature*. Penguin.
- Lewin, K. (1943). Defining the 'field at a given time.'. *Psychological Review*, 50(3), 292.
- Limb, C. J., & Braun, A. R. (2008). Neural substrates of spontaneous musical performance: an fMRI study of jazz improvisation. *PLoS One*, 3(2), e1679.
- Lindenberger, U. (2014). Hyper-Brain Networks Support Romantic Kissing in Humans, 9(11). doi:10.1371/journal.pone.0112080
- Lindenberger, U., Li, S.-C., Gruber, W., & Müller, V. (2009). Brains swinging in concert: cortical phase synchronization while playing guitar. *BMC Neuroscience*, 10, 22. doi:10.1186/1471-2202-10-22
- Lingnau, A., Gesierich, B., & Caramazza, A. (2009). Asymmetric fMRI adaptation reveals no evidence for mirror neurons in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(24), 9925-9930.
- Littlewort, G., Bartlett, M. S., Fasel, I., Susskind, J., & Movellan, J. (2006). Dynamics of facial expression extracted automatically from video. *Image and Vision Computing*, 24(6), 615–625.
- Lombardo, M. V., Chakrabarti, B., Bullmore, E. T., Baron-Cohen, S., & Consortium, M. R. C. A. (2011). Specialization of right temporo-parietal junction for mentalizing and its relation to social impairments in autism. *Neuroimage*, 56(3), 1832–1838.
- Lopes da Silva, F. L. (2004). Functional localization of brain sources using EEG and/or MEG data: volume conductor and source models. *Magnetic Resonance Imaging*, 22(10), 1533–1538.

- Lopes da Silva FH (2005) Event Related Potentials: Methodology and Quantification. In: Electroencephalography. Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields. Niedermeyer E and Lopes da Silva FH (Eds), 5th ed., New York: Lippincott Williams & Wilkins, 991-1001
- Makeig, S., Bell, A. J., Jung, T.-P., & Sejnowski, T. J. (1996). Independent component analysis of electroencephalographic data. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 145–151.
- Makeig, S., Debener, S., Onton, J., & Delorme, A. (2004). Mining event-related brain dynamics. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(5), 204–210.
- Makeig, S., & Onton, J. (2011). Oxford Handbook of Event-Related Potential Components. New York, NY: Oxford University Press.
- Manly, B. F. J. (2006). *Randomization, bootstrap and Monte Carlo methods in biology* (Vol. 70). CRC Press.
- Mann, C. A., Lubar, J. F., Zimmerman, A. W., Miller, C. A., & Muenchen, R. A. (1992). Quantitative analysis of EEG in boys with attention-deficit-hyperactivity disorder: Controlled study with clinical implications. *Pediatric Neurology*, 8(1), 30–36.
- Maranesi, M., Livi, A., Fogassi, L., Rizzolatti, G., & Bonini, L. (2014). Mirror Neuron Activation Prior to Action Observation in a Predictable Context. *The Journal of Neuroscience*, 34(45), 14827–14832.
- McDougall, W. (2003). *An introduction to social psychology*. Courier Corporation.
- Meister, I. G., Krings, T., Foltys, H., Boroojerdi, B., Müller, M., Töpper, R., & Thron, a. (2004). Playing piano in the mind--an fMRI study on music imagery and performance in pianists. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 19(3), 219–28. doi:10.1016/j.cogbrainres.2003.12.005
- Meltzoff, A. N., & Moore, M. K. (1977). Imitation of facial and manual gestures by human neonates. *Science*, 198(4312), 75–78.
- Menon, V., & Levitin, D. J. (2005). The rewards of music listening: response and physiological connectivity of the mesolimbic system. *NeuroImage*, 28(1), 175–84. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.05.053
- Milgram, S., & Van den Haag, E. (1978). Obedience to authority. Ziff-Davis Publishing Company.
- Miller, G. (2000). *Evolution of human music through sexual selection*.
- Miller, G. F. (2001). Aesthetic fitness: How sexual selection shaped artistic virtuosity as a fitness indicator and aesthetic preferences as mate choice criteria. *Bulletin of Psychology and the Arts*, 2(1), 20–25.
- Mithen, S. J. (2005). *The singing Neanderthals: The origins of music, language, mind, and body*. Harvard University Press.
- Mitterschiffthaler, M. T., Fu, C. H. Y., Dalton, J. a, Andrew, C. M., & Williams, S. C. R. (2007). A functional MRI study of happy and sad affective states induced by classical music. *Human Brain Mapping*, 28(11), 1150–62. doi:10.1002/hbm.20337

- Molenberghs, P., Cunnington, R., & Mattingley, J. B. (2012). Brain regions with mirror properties: a meta-analysis of 125 human fMRI studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *36*(1), 341–349.
- Montague, P. (2002). Hyperscanning: Simultaneous fMRI during Linked Social Interactions. *NeuroImage*, *16*(4), 1159–1164. doi:10.1006/nimg.2002.1150
- Mormann, F., Lehnertz, K., David, P., & Elger, C. E. (2000). Mean phase coherence as a measure for phase synchronization and its application to the EEG of epilepsy patients. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, *144*(3), 358–369.
- Müller, V., & Lindenberger, U. (2011). Cardiac and Respiratory Patterns Synchronize between Persons during Choir Singing. *PLoS ONE*, *6*(9), e24893. doi:10.1371/journal.pone.0024893
- Müller, V., & Lindenberger, U. (2014). Hyper-brain networks support romantic kissing in humans. *PLoS One*, *9*(11), e112080. doi:10.1371/journal.pone.0112080
- Müller, V., Sängler, J., & Lindenberger, U. (2013). Intra- and inter-brain synchronization during musical improvisation on the guitar. *PLoS One*, *8*(9), e73852. doi:10.1371/journal.pone.0073852
- Münste, T. F., Altenmüller, E., & Jäncke, L. (2002). The musician's brain as a model of neuroplasticity. *Nature Reviews Neuroscience*, *3*(6), 473–478.
- Musacchia, G., Sams, M., Skoe, E., & Kraus, N. (2007). Musicians have enhanced subcortical auditory and audiovisual processing of speech and music. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *104*(40), 15894–15898.
- Naeem, M., Prasad, G., Watson, D. R., & Kelso, J. a S. (2012). Electrophysiological signatures of intentional social coordination in the 10-12 Hz range. *NeuroImage*, *59*(2), 1795–803. doi:10.1016/j.neuroimage.2011.08.010
- Neisser, U. (1976). *Cognition and reality: Principles and implications of cognitive psychology*.
- Neville, H. J., Bavelier, D., Corina, D., Rauschecker, J., Karni, A., Lalwani, A., ... Turner, R. (1998). Cerebral organization for language in deaf and hearing subjects: biological constraints and effects of experience. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *95*(3), 922–929.
- Niedermeyer, E. (2005a). 9. The normal EEG of the waking adult. *Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields*, 167.
- Niedermeyer E (2005b) Sleep and EEG. In: *Electroencephalography. Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields*. Niedermeyer E and Lopes da Silva FH (Eds), 5th ed., New York: Lippincott Williams & Wilkins, 193-207.
- Niedermeyer E (2005c) Epileptic Seizure Disorders. In: *Electroencephalography. Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields*. Niedermeyer E and Lopes da Silva FH (Eds), 5th ed., New York: Lippincott Williams & Wilkins, 505-619.
- North, A. C., & Hargreaves, D. J. (1999). Music and adolescent identity. *Music Education Research*, *1*(1), 75–92.

- Nummenmaa, L., Glerean, E., Viinikainen, M., Jääskeläinen, I. P., Hari, R., & Sams, M. (2012). Emotions promote social interaction by synchronizing brain activity across individuals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *109*(24), 9599–604. doi:10.1073/pnas.1206095109
- Nunez, P. L., & Srinivasan, R. (2006). *Electric fields of the brain: the neurophysics of EEG*. Oxford university press.
- Ochsner, K. N., & Lieberman, M. D. (2001). The emergence of social cognitive neuroscience. *American Psychologist*, *56*(9), 717.
- Omidvarnia, A., Azemi, G., Colditz, P. B., & Boashash, B. (2013). A time–frequency based approach for generalized phase synchrony assessment in nonstationary multivariate signals. *Digital Signal Processing*, *23*(3), 780–790.
- Onton, J., Westerfield, M., Townsend, J., & Makeig, S. (2006). Imaging human EEG dynamics using independent component analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *30*(6), 808–822.
- Osaka, N., Minamoto, T., Yaoi, K., Azuma, M., & Osaka, M. (2014). Neural Synchronization During Cooperated Humming: A Hyperscanning Study Using fNIRS. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *126*, 241–243. doi:10.1016/j.sbspro.2014.02.395
- Osaka, N., Minamoto, T., Yaoi, K., Azuma, M., Shimada, Y. M., & Osaka, M. (2015). How Two Brains Make One Synchronized Mind in the Inferior Frontal Cortex: fNIRS-Based Hyperscanning During Cooperative Singing. *Frontiers in Psychology*, *6*.
- Osipova, D., Hermes, D., & Jensen, O. (2008). Gamma power is phase-locked to posterior alpha activity. *PLoS One*, *3*(12), e3990.
- Oullier, O., de Guzman, G. C., Jantzen, K. J., Lagarde, J., & Kelso, J. a S. (2008). Social coordination dynamics: measuring human bonding. *Social Neuroscience*, *3*(2), 178–92. doi:10.1080/17470910701563392
- Overy, K., & Molnar-Szakacs, I. (2009). Being Together in Time: Musical Experience and the Mirror Neuron System. *Music Perception*, *26*(5), 489–504. doi:10.1525/mp.2009.26.5.489
- Panksepp, J. (1995). The emotional sources of “chills” induced by music. *Music Perception*, *17*1–207.
- Pantev, C., Oostenveld, R., Engelien, A., Ross, B., Roberts, L. E., & Hoke, M. (1998). Increased auditory cortical representation in musicians. *Nature*, *392*(6678), 811–814.
- Pascual-Marqui, R. D. (2002). Standardized low resolution brain electromagnetic tomography (sLORETA): technical details. *Methods & Findings in Experimental & Clinical Pharmacology*, 1–16.
- Pascual-Marqui, R. D. (2007). Instantaneous and lagged measurements of linear and nonlinear dependence between groups of multivariate time series: frequency decomposition. *arXiv Preprint arXiv:0711.1455*.
- Patel, A. D. (2003). Language, music, syntax and the brain. *Nature Neuroscience*, *6*(7), 674–681.
- Patel, A. D. (2011). Why would musical training benefit the neural encoding of speech? The OPERA hypothesis. *Frontiers in Psychology*, *2*.

- Pelphrey, K. a., Viola, R. J., & McCarthy, G. (2004). When Strangers Pass. *Psychological Science*, 15(9), 598–603. doi:10.1111/j.0956-7976.2004.00726.x
- Peretz, I., & Gagnon, L. (1999). Dissociation between recognition and emotional judgements for melodies. *Neurocase*.
- Peretz, I., Gagnon, L., & Bouchard, B. (1998). Music and emotion: perceptual determinants, immediacy, and isolation after brain damage. *Cognition*, 68(2), 111–41.
- Petitto, L. A., Zatorre, R. J., Gauna, K., Nikelski, E. J., Dostie, D., & Evans, A. C. (2000). Speech-like cerebral activity in profoundly deaf people processing signed languages: implications for the neural basis of human language. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(25), 13961–13966.
- Pinker, S. (1997). How the mind works. 1997. NY: Norton.
- Pinti, P., Aichelburg, C., Lind, F., Power, S., Swingler, E., Merla, A., ... Tachtsidis, I. (2015). Using Fiberless, Wearable fNIRS to Monitor Brain Activity in Real-world Cognitive Tasks. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, (106), e53336–e53336.
- Preston, S. D., & De Waal, F. (2002). Empathy: Its ultimate and proximate bases. *Behavioral and Brain Sciences*, 25(01), 1–20.
- Rabinovich, M. I., Afraimovich, V. S., Bick, C., & Varona, P. (2012). Information flow dynamics in the brain. *Physics of Life Reviews*, 9(1), 51–73.
- Randel, D. M. (2003). *The Harvard dictionary of music* (Vol. 16). Harvard University Press.
- Redcay, E., Dodell-Feder, D., & Pearrow, M. (2010). Live face-to-face interaction during fMRI: a new tool for social cognitive neuroscience. *Neuroimage*, 50(4), 1639–1647. doi:10.1016/j.neuroimage.2010.01.052.Live
- Reed, K., Peshkin, M., Hartmann, M. J., Grabowecy, M., Patton, J., & Vishton, P. M. (2006). Haptically Linked Dyads Are Two Motor-Control Systems Better Than One? *Psychological Science*, 17(5), 365–366.
- Repp, B. (1999). Effects of auditory feedback deprivation on expressive piano performance. *Music Perception*, 16, 409–438.
- Riley, M. a., Richardson, M. J., Shockley, K., & Ramenzoni, V. C. (2011). Interpersonal synergies. *Frontiers in Psychology*, 2(March), 1–7. doi:10.3389/fpsyg.2011.00038
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V., & Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 3(2), 131–41.
- Rosenblum, M. G., Cimponeriu, L., Bezerianos, A., Patzak, A., & Mrowka, R. (2002). Identification of coupling direction: application to cardiorespiratory interaction. *Physical Review E*, 65(4), 41909.
- Rudrauf, D., Douiri, A., Kovach, C., Lachaux, J.-P., Cosmelli, D., Chavez, M., ... Le Van Quyen, M. (2006). Frequency flows and the time-frequency dynamics of multivariate phase synchronization in brain signals. *Neuroimage*, 31(1), 209–227.
- Russo, W. (1997). *Jazz composition and orchestration*. University of Chicago Press.
- Sadato, N., Campbell, G., Ibanez, V., Deiber, M., & Hallett, M. (1996). Complexity affects regional cerebral blood flow change during sequential finger movements. *The Journal of Neuroscience*, 16(8), 2691–2700.

- Sakata, H., Takaoka, Y., Kawarasaki, A., & Shibutani, H. (1973). Somatosensory properties of neurons in the superior parietal cortex (area 5) of the rhesus monkey. *Brain Research*, *64*, 85–102.
- Sänger, J., Müller, V., & Lindenberger, U. (2012). Intra- and interbrain synchronization and network properties when playing guitar in duets. *Frontiers in Human Neuroscience*, *6*(November), 312. doi:10.3389/fnhum.2012.00312
- Sänger, J., Müller, V., & Lindenberger, U. (2013). Directionality in hyperbrain networks discriminates between leaders and followers in guitar duets. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*(June), 1–14. doi:10.3389/fnhum.2013.00234
- Saxe, R., & Kanwisher, N. (2003). People thinking about thinking people: the role of the temporo-parietal junction in “theory of mind.” *Neuroimage*, *19*(4), 1835–1842.
- Schack, B., Klimesch, W., & Sauseng, P. (2005). Phase synchronization between theta and upper alpha oscillations in a working memory task. *International Journal of Psychophysiology*, *57*(2), 105–114.
- Scheidt, R. J. (1981). Ecologically-valid inquiry: Fait accompli? *Human Development*, *24*(3), 225–228.
- Schilbach, L., Timmermans, B., & Reddy, V. (2012). Toward a second-person neuroscience. *Behav. Brain ...*, 1–77.
- Schmidt, L. A., & Trainor, L. J. (2001). Frontal brain electrical activity (EEG) distinguishes valence and intensity of musical emotions. *Cognition & Emotion*, *15*(4), 487–500.
- Schmuckler, M. a. (2001). What is ecological validity? A dimensional analysis. *Infancy*, *2*(4), 419–436. doi:10.1207/S15327078IN0204\_02
- 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), 813. doi:10.3389/fnhum.2013.00813
- Sebanz, N., Bekkering, H., & Knoblich, G. (2006). Joint action: bodies and minds moving together. *Trends in Cognitive Sciences*, *10*(2), 70–6. doi:10.1016/j.tics.2005.12.009
- Seeley, W. W., Menon, V., Schatzberg, A. F., Keller, J., Glover, G. H., Kenna, H., ... Greicius, M. D. (2007). Dissociable intrinsic connectivity networks for salience processing and executive control. *The Journal of Neuroscience*, *27*(9), 2349–2356.
- Senju, A., & Johnson, M. H. (2009). The eye contact effect: mechanisms and development. *Trends in Cognitive Sciences*, *13*(3), 127–134.
- Shahin, A. J., Roberts, L. E., Chau, W., Trainor, L. J., & Miller, L. M. (2008). Music training leads to the development of timbre-specific gamma band activity. *NeuroImage*, *41*(1), 113–22. doi:10.1016/j.neuroimage.2008.01.067
- Singer, T., Seymour, B., O’Doherty, J., Kaube, H., Dolan, R. J., & Frith, C. D. (2004). Empathy for pain involves the affective but not sensory components of pain. *Science*, *303*(5661), 1157–1162.

- Sluming, V., Brooks, J., Howard, M., Downes, J. J., & Roberts, N. (2007). Broca's area supports enhanced visuospatial cognition in orchestral musicians. *The Journal of Neuroscience : The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *27*(14), 3799–806. doi:10.1523/JNEUROSCI.0147-07.2007
- Sluming, V., & Manning, J. (2000). Second to fourth digit ratio in elite musicians: Evidence for musical ability as an honest signal of male fitness. *Evolution and Human Behavior*, *21*, 1–9.
- Southgate, V., Johnson, M. H., Osborne, T., & Csibra, G. (2009). Predictive motor activation during action observation in human infants. *Biology Letters*.
- Sperber, D. (1996). *Explaining culture*. Blackwell Publishers Oxford.
- Stephan, K. E., Riera, J. J., Deco, G., & Horwitz, B. (2008). The brain connectivity workshops: moving the frontiers of computational systems neuroscience. *Neuroimage*, *42*(1), 1–9.
- Stephens, G. J., Silbert, L. J., & Hasson, U. (2010). Speaker-listener neural coupling underlies successful communication. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *107*(32), 14425–14430. doi:10.1073/pnas.1008662107
- Steriade, M. (2005). Cellular substrates of brain rhythms. *Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields*, *5*, 31–83.
- Stone, B., Skinner, A., Stikic, M., & Johnson, R. (2014). Assessing neural synchrony in tutoring dyads. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. doi:10.1007/978-3-319-07527-3-16
- Stouffer, S. A., Lumsdaine, A. A., Lumsdaine, M. H., Williams Jr, R. M., Smith, M. B., Janis, I. L., ... Cottrell Jr, L. S. (1949). *The American soldier: combat and its aftermath*. (Studies in social psychology in World War II, Vol. 2.).
- Swain, J. P. (2002). *Harmonic rhythm: Analysis and interpretation*. Oxford University Press.
- Tarde, G. (1895). *Les lois de l'imitation: étude sociologique*. Alcan.
- Tervaniemi, M. (2003). Musical sound processing: EEG and MEG evidence. *The Cognitive Neuroscience of Music*, 294–309.
- Thompson, E., & Varela, F. J. (2001). Radical embodiment: neural dynamics and consciousness. *Trends in Cognitive Sciences*, *5*(10), 418–425.
- Tognoli, E., & Kelso, J. a S. (2009). Brain coordination dynamics: true and false faces of phase synchrony and metastability. *Progress in Neurobiology*, *87*(1), 31–40. doi:10.1016/j.pneurobio.2008.09.014
- Tognoli, E., Lagarde, J., DeGuzman, G. C., & Kelso, J. a S. (2007). The phi complex as a neuromarker of human social coordination. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *104*(19), 8190–5. doi:10.1073/pnas.0611453104
- Tomlin, D., Kayali, M. A., King-Casas, B., Anen, C., Camerer, C. F., Quartz, S. R., & Montague, P. R. (2006). Agent-specific responses in the cingulate cortex during economic exchanges. *Science (New York, N.Y.)*, *312*(5776), 1047–1050. doi:10.1126/science.1125596

- Tort, A. B. L., Komorowski, R. W., Manns, J. R., Kopell, N. J., & Eichenbaum, H. (2009). Theta-gamma coupling increases during the learning of item–context associations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *106*(49), 20942–20947.
- Trehub, S. (2003). The developmental origins of musicality. *Nature Neuroscience*, *6*(7), 669–673.
- Trehub, S. E., Hill, D. S., & Kamenetsky, S. B. (1997). Parents' sung performances for infants. *Canadian Journal of Experimental Psychology = Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, *51*(4), 385–96.
- Van Knippenberg, D. (2011). Embodying who we are: Leader group prototypicality and leadership effectiveness. *The Leadership Quarterly*, *22*(6), 1078–1091.
- Vines, B. W., Krumhansl, C. L., Wanderley, M. M., Dalca, I. M., & Levitin, D. J. (2005). Dimensions of emotion in expressive musical performance. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1060*, 462–6. doi:10.1196/annals.1360.052
- Vines, B. W., Krumhansl, C. L., Wanderley, M. M., & Levitin, D. J. (2006). Cross-modal interactions in the perception of musical performance. *Cognition*, *101*(1), 80–113. doi:10.1016/j.cognition.2005.09.003
- Volman, I., Toni, I., Verhagen, L., & Roelofs, K. (2011). Endogenous testosterone modulates prefrontal-amygdala connectivity during social emotional behavior. *Cerebral Cortex*, *21*(10), 2282–2290. doi:10.1093/cercor/bhr001
- Welch, P. D. (1967). The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, *15*(2), 70–73.
- Wertheimer, M. (1938). *Gestalt theory*. Hayes Barton Press.
- Wicker, B., Perrett, D. I., Baron-cohen, S., & Decety, J. (2003). Being the target of another' s emotion : a PET study. *Neuropsychologia*, *41*, 139–146.
- Yun, K., Chung, D., & Jeong, J. (2008). Emotional Interactions in Human Decision Making using EEG Hyperscanning. In *International conference of cognitive science, Seoul, Korea* (Vol. 2, pp. 1–4).
- Yun, K., Watanabe, K., & Shimojo, S. (2012). Interpersonal body and neural synchronization as a marker of implicit social interaction. *Scientific Reports*, *2*, 959. doi:10.1038/srep00959
- Zaki, J., & Ochsner, K. N. (2012). The neuroscience of empathy: progress, pitfalls and promise. *Nature Neuroscience*, *15*(5), 675–680.
- Zatorre, R. J., Chen, J. L., & Penhune, V. B. (2007). When the brain plays music: auditory-motor interactions in music perception and production. *Nature Reviews. Neuroscience*, *8*(7), 547–58. doi:10.1038/nrn2152
- Zatorre, R. J., & Halpern, A. R. (2005). Mental concerts: Musical imagery and auditory cortex. *Neuron*, *47*, 9–12. doi:10.1016/j.neuron.2005.06.013



# **Annexes**



# Annexes

## 6.1 Questionnaires session

### Questionnaire – Piano à Quatre Mains

Gipsa-Lab  
Equipe ViBS  
2013

Cadre expérimentateur		
Code Groupe	Code Sujet	Code Session

#### Informations générales sur le participant :

Âge : .....

Genre :  

Main directrice : Droite / Gauche

#### Informations générales sur l'expérience :

N°	Questions	Réponses
1	Depuis combien de temps faites-vous du piano ?	.....
2	- du piano à quatre mains ?	.....
3	Êtes-vous familier avec la pièce proposée ?	Non    Un peu    Oui
4	Êtes-vous familier avec le compositeur de la pièce ?	Non    Un peu    Oui
5	Êtes-vous familier avec l'époque du compositeur de la pièce ?	Non    Un peu    Oui
7	Depuis combien de temps connaissez-vous votre binôme au piano ?	.....
8	Comment l'avez-vous connu si c'est en dehors de l'expérience ?	..... .....

# Questionnaire – Piano à Quatre Mains

Gipsa-Lab

Equipe ViBS

2013

<i>Cadre expérimentateur</i>		
Code Groupe	Code Sujet	Code Session

## Informations pré-session :

Utilisez l'échelle suivante pour indiquer votre degré d'accord ou de désaccord avec les questions possédant une échelle.

Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Plutôt pas d'accord	Ni en désaccord ni d'accord	Plutôt d'accord	D'accord	Tout à fait d'accord
1	2	3	4	5	6	7

## N° Questions

## Réponses

- |          |   |                         |
|----------|---|-------------------------|
| <b>1</b> | Heures de sommeil approximatives la nuit précédente :   | .....                   |
| <b>2</b> | Vous sentez vous fatigué(e) au moment de l'expérience ?   | 1 2 3 4 5 6 7           |
| <b>3</b> | Avez-vous l'habitude de voir votre binôme en dehors des séances d'entraînement pour l'expérience ? Si oui, à quelle fréquence et pour quelles raisons ? (i.e., 2/semaine pour travail, ami, famille...) | .....<br>.....<br>..... |
| <b>4</b> | De façon générale, vous sentez-vous proche de votre binôme ?  | 1 2 3 4 5 6 7           |

<i>Cadre expérimentateur</i>		
Code Groupe	Code Sujet	Code Session

Informations post-session :

N°	Questions	Réponses						
1	Est-ce que le côté technique de la pièce vous a paru difficile personnellement ?	1	2	3	4	5	6	7
2	- en tant que binôme ?	1	2	3	4	5	6	7
3	Est-ce que la qualité de votre interprétation vous a semblé satisfaisante personnellement ?	1	2	3	4	5	6	7
4	- en tant que binôme ?	1	2	3	4	5	6	7
6	Est-ce que la mise en place du quatre mains vous paraît aisée ?	1	2	3	4	5	6	7
7	Avez-vous bien réussi à communiquer avec votre binôme lors de la performance ?	1	2	3	4	5	6	7
8	Est-ce que jouer cette pièce vous a paru enrichissant ?	1	2	3	4	5	6	7

Commentaires additionnels :

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

## 6.2 Questionnaires empathie

### Questionnaire d'empathie (CEC)

<i>Cadre expérimentateur</i>		
Code Groupe	Code Sujet	Code Session

Utilisez l'échelle suivante pour indiquer votre degré d'accord ou de désaccord avec les situations décrites ci-dessous. Le nombre sélectionné doit correspondre à la position que vous prendriez dans la situation décrite (non à celle que vous souhaiteriez adopter). Veuillez à répondre à chacune des 36 situations.

**+2: très fortement en accord**

**+1: assez d'accord**

**0: aucune opinion**

**-1: désaccord moyen**

**-2: très fortement en désaccord**

N°	Question	Réponse				
		+2	+1	0	-1	-2
1	Quand je vois une personne que je ne connais pas, seule, alors qu'il y a près d'elle un groupe qui s'amuse, j'essaie de sentir si cela lui convient ou non d'être seule.	<input type="checkbox"/>				
2	C'est agréable pour moi de voir quelqu'un qui rit parce que je me dis qu'il est heureux.	<input type="checkbox"/>				
3	Les démonstrations d'affection en public le plus souvent ça m'agace.	<input type="checkbox"/>				
4	Je serais totalement incapable d'annoncer des mauvaises nouvelles à quelqu'un car j'aurais trop de peine.	<input type="checkbox"/>				
5	Lorsque je vois quelqu'un pleurer ça me fait perdre tous mes moyens.	<input type="checkbox"/>				
6	Les démonstrations d'affection en public me donnent envie de vivre beaucoup de moments comme cela.	<input type="checkbox"/>				
7	Voir des gens qui pleurent de joie me donne envie de pleurer avec eux.	<input type="checkbox"/>				
8	Quand je lis un roman, il m'est difficile d'éprouver profondément les sentiments d'un personnage.	<input type="checkbox"/>				
9	Quand un ami a des problèmes graves, je l'écoute si ça lui fait du bien d'en parler.	<input type="checkbox"/>				
10	Quand je vois une personne que je ne connais pas, seule, alors qu'il y a près d'elle un groupe qui s'amuse, je préfère l'ignorer et je regarde plutôt le groupe.	<input type="checkbox"/>				
11	Lorsque je vois quelqu'un pleurer ça me provoque un petit rire nerveux.	<input type="checkbox"/>				
12	Si les autres autour de moi s'agitent comme des fous, je ne peux pas m'empêcher d'être moi aussi très excité.	<input type="checkbox"/>				

13	Quand quelqu'un rit très fort, j'éclate facilement de rire avec lui.	<input type="checkbox"/>				
14	Il me serait pénible d'annoncer des mauvaises nouvelles à quelqu'un.	<input type="checkbox"/>				
15	Il m'est difficile de comprendre comment certaines choses peuvent affecter les gens jusqu'à les rendre déprimés.	<input type="checkbox"/>				
16	J'apprécie les démonstrations d'affection en public car j'aime bien les gens qui expriment leurs sentiments.	<input type="checkbox"/>				
17	Lorsque je vois quelqu'un pleurer, j'attends près de lui qu'il se calme.	<input type="checkbox"/>				
18	Je suis facilement submergé(e) d'émotions lorsqu'un ami a des problèmes graves.	<input type="checkbox"/>				
19	Lorsque je lis un roman, j'arrive bien à imaginer les sentiments qu'un personnage peut ressentir.	<input type="checkbox"/>				
20	Quand une personne que j'aime est malheureuse, je ne peux pas le supporter, ça me rend trop malheureux.	<input type="checkbox"/>				
21	Quand je vois des personnes en détresse qui n'ont pas d'aide, je suis ému(e) et j'aimerais pouvoir les aider.	<input type="checkbox"/>				
22	Les gens qui pleurent de joie, je les trouve ridicules.	<input type="checkbox"/>				
23	Je ne peux pas m'empêcher de donner de l'argent aux personnes en détresse qui n'ont pas d'aide.	<input type="checkbox"/>				
24	Je me sens tout(e) triste lorsque je vois une personne que je ne connais pas, seule, alors qu'il y a près d'elle un groupe qui s'amuse.	<input type="checkbox"/>				
25	Si les autres autour de moi font les fous, je suis mal à l'aise, j'essaye de les calmer.	<input type="checkbox"/>				
26	Quand je vois des personnes en détresse qui n'ont pas d'aide, je me dis qu'ils n'ont qu'à se prendre en main, il y a toujours une solution.	<input type="checkbox"/>				
27	Je suis capable de garder mon calme lorsque ceux qui sont autour de moi sont très agités.	<input type="checkbox"/>				
28	Quand une personne que j'aime est malheureuse ça me fait de la peine pour elle.	<input type="checkbox"/>				
29	Quand un ami a des problèmes graves, je l'évite pendant quelque temps.	<input type="checkbox"/>				
30	Annoncer des mauvaises nouvelles à quelqu'un ça ne me pose aucun problème.	<input type="checkbox"/>				
31	Quand quelqu'un rit ça n'a aucun effet sur moi.	<input type="checkbox"/>				
32	Si les autres autour de moi sont déprimés, je ne peux pas me sentir bien et moi aussi je déprime.	<input type="checkbox"/>				
33	Quand une personne que j'aime est malheureuse, je suis irrité(e) et je cherche la cause de son malheur.	<input type="checkbox"/>				
34	Je trouve émouvants les gens qui pleurent de joie.	<input type="checkbox"/>				
35	Quand je lis un roman, je ressens très fort les sentiments des personnages, je pleure	<input type="checkbox"/>				

	quand ils pleurent, je ris quand ils rient.					
36	Si les autres autour de moi sont déprimés, leur souffrance me touche, mais ça ne me rend pas déprimé(e).	<input type="checkbox"/>				

## Questionnaire d'empathie, analyse des résultats (CEC)

Le participant indique sa réponse sur une échelle allant de (- 2) à (+ 2). Nous transposons ensuite sur une échelle de un à cinq pour chacun des 36 items.

**Méthode de calcul** : Nous faisons la somme des 12 réponses par dimension transposées au préalable entre 0 et 1 (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1)

**Chaque dimension est pondérée suivant : (empathie = 2, contagion = 1, coupure = -1)**

Items pour chaque dimension :

- **Empathie** : items 1, 6, 9, 14, 16, 17, 19, 21, 27, 28, 34, 36
- **Contagion émotionnelle** : items 2, 4, 5, 7, 12, 13, 18, 20, 23, 24, 32, 35.
- **Coupure par rapport aux émotions** : items 3, 8, 10, 11, 15, 22, 25, 26, 29, 30, 31, 33.

A titre indicatif, moyennes et écart-type sur un échantillon de 94 personnes :

- **Contagion** : moyenne=2,8                      écart-type=1,7
- **Empathie** : moyenne=7,3                      écart-type=2,2
- **Coupure** : moyenne=1,9 ;                      écart-type=1,6

Corrélations entre les échelles du CEC et le BEES.

Études et échelles du BEES	Échelles du CEC		
	Contagion	Empathie	Coupure
Étude 1 Primaire Montpellier ( <i>n</i> = 64)			
BEES positif	0,20	0,21	-0,37**
BEES négatif	0,13	-0,23	0,10
BEES total	0,07	0,32**	-0,36**
Étude 2 Secondaire Suisse ( <i>n</i> = 204)			
BEES positif	0,34**	0,06	-0,42**
BEES négatif	-0,05	-0,25**	0,35**
BEES total	0,24**	0,19**	-0,49**
Étude 3 Secondaire Canada ( <i>n</i> = 218)			
BEES positif	0,35**	0,24**	-0,62**
BEES négatif	-0,32**	-0,21**	0,56**
BEES total	0,37**	0,25**	-0,65**

BEES: Balanced Emotional Empathy Scale; CEC: Coupure-Empathie-Contagion; signification statistique: \**p* < 0,05; \*\**p* < 0,01.

# The Cambridge Behaviour Scale

(Baron-Cohen & Wheelwright, 2004)

## Adaptation française

(L. Weiner et J. Henry, 2007)<sup>2</sup>

<i>Cadre expérimentateur</i>		
Code Groupe	Code Sujet	Code Session

### Comment remplir cette échelle :

Voici une liste de situations. Veuillez lire chacune d'elles très attentivement et précisez, en entourant la réponse, dans quelle mesure vous êtes d'accord ou pas. Il n'y a pas de bonnes ou de mauvaises réponses, ni de question piège.

**POUR QUE CETTE ECHELLE SOIT VALIDE, VOUS DEVEZ REpondre A CHAQUE QUESTION.**

### Exemples :

E1	Je serais très contrarié(e) si je ne pouvais pas écouter de musique tous les jours.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
E2	Je préfère téléphoner à mes amis plutôt que leur écrire une lettre.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
E3	Je n'ai pas réellement envie de voyager à travers le monde.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
E4	Je préfère lire que danser.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord

---

<sup>2</sup> Luisa.weiner@ch-epsan.fr

N°	Etats	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
1	Je remarque facilement si quelqu'un d'autre souhaite prendre part à la conversation.				
2	Je préfère les animaux aux humains.				
3	J'essaie de suivre les tendances actuelles et la mode.				
4	Je trouve difficile d'expliquer aux autres des choses que je comprends facilement si eux ne les comprennent pas du premier coup.				
5	Je rêve presque toutes les nuits.				
6	J'apprécie vraiment de prendre soin des autres.				
7	J'essaie de résoudre mes problèmes par moi-même plutôt que d'en discuter avec les autres.				
8	Je trouve difficile de savoir quoi faire en société.				
9	C'est tôt le matin que je suis au mieux de ma forme.				
10	Souvent on me dit que je suis allé(e) trop loin pour défendre mon opinion dans une discussion.				
11	Ça ne me gêne pas d'arriver en retard à un rendez-vous avec un(e) ami(e).				
12	Les relations amicales et sentimentales sont vraiment trop compliquées, donc j'ai tendance à ne pas m'en soucier.				
13	Je ne transgresserais jamais une loi, aussi mineure soit-elle.				
14	J'ai souvent du mal à juger si quelque chose est grossier ou poli.				
15	Au cours d'une conversation, j'ai tendance à me concentrer sur mes propres idées plutôt que sur ce que peut penser la personne qui m'écoute.				
16	Je préfère les farces aux histoires drôles.				
17	Je vis au jour le jour plutôt que de me projeter dans l'avenir.				
18	Quand j'étais enfant, j'aimais découper des verres de terre pour voir ce qu'il se passait.				
19	Je comprends vite si une personne dit quelque chose mais en pense une autre.				
20	J'ai tendance à avoir des opinions bien arrêtées sur la moralité.				
21	Il m'est difficile de comprendre pourquoi certaines choses affectent autant les gens.				
22	Je trouve facile de me mettre à la place des autres.				
23	Je pense que les bonnes manières sont ce que les parents peuvent enseigner de plus important à leurs enfants.				
24	J'aime faire les choses sous l'impulsion du moment.				
25	Je suis doué(e) pour prédire ce que quelqu'un pourrait ressentir.				

N°	Etats	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
26	Je repère facilement si dans un groupe quelqu'un se sent mal à l'aise ou embarrassé.				
27	Si je dis quelque chose qui offense quelqu'un, je pense que c'est son problème et non le mien.				
28	Si quelqu'un me demande si j'aime sa coupe de cheveux, je réponds honnêtement, même si elle ne me plaît pas.				
29	Je ne me rends pas toujours compte pourquoi quelqu'un devrait se sentir offensé par une remarque.				
30	On me dit souvent que je suis imprévisible.				
31	J'aime être le centre d'intérêt en société.				
32	Ça ne me bouleverse pas vraiment de voir quelqu'un pleurer.				
33	J'aime parler de politique.				
34	Je suis très direct(e), ce que les gens prennent souvent pour de l'impolitesse, alors que ce n'est pas mon intention.				
35	Je n'ai pas tendance à considérer les situations sociales comme déroutantes.				
36	On me dit que je suis doué(e) pour comprendre ce que les gens ressentent et pensent.				
37	Lorsque je parle aux gens, j'ai tendance à parler de leurs propres expériences plutôt que des miennes.				
38	Je suis bouleversé(e) lorsque je vois un animal souffrir.				
39	Je suis capable de prendre des décisions sans être influencé(e) par les sentiments des gens.				
40	Je n'arrive pas à me détendre tant que je n'ai pas fini de faire tout ce que j'avais prévu pour la journée.				
41	Je remarque facilement si quelqu'un est intéressé ou ennuyé par ce que je dis.				
42	Je suis bouleversé(e) quand je vois des gens souffrir aux informations.				
43	Généralement, mes amis me parlent de leurs problèmes car ils disent que je suis très compréhensif(ve).				
44	Je peux sentir quand je dérange quelqu'un, même si la personne ne me le dit pas.				
45	Je me lance souvent dans de nouveaux passe-temps, mais je m'en lasse rapidement et je passe à autre chose.				
46	Souvent les gens me disent que je suis allé(e) trop loin en les taquinant.				
47	Je serais bien trop anxieux(se) pour aller sur des montagnes russes.				
48	On me dit souvent que je suis insensible, mais je ne vois pas toujours pourquoi.				
49	Si je vois une personne étrangère dans un groupe, je considère que c'est à elle de faire l'effort de s'intégrer.				

N°	Etats	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
50	En général, je reste émotionnellement détaché(e) lorsque je regarde un film.				
51	J'aime être très organisé(e) dans ma vie de tous les jours, et je fais souvent des listes de ce que je dois faire.				
52	Je peux voir rapidement et intuitivement comment une personne se sent.				
53	Je n'aime pas prendre de risque.				
54	Je peux facilement déterminer de quoi une personne voudrait parler.				
55	Je peux dire si quelqu'un cache ses véritables émotions.				
56	Avant de prendre une décision, je pèse toujours le pour et le contre.				
57	Je n'évalue pas sciemment les règles en jeu dans les situations sociales.				
58	Je suis doué(e) pour prédire ce qu'une personne va faire.				
59	J'ai tendance à être impliqué(e) émotionnellement dans les problèmes de mes amis.				
60	Généralement, je peux comprendre le point de vue de mon interlocuteur, même si je ne suis pas d'accord.				

**Merci d'avoir rempli ce questionnaire.**

<i>Cadre expérimentateur</i>		
Code Groupe	Code Sujet	Code Session

## The Empathy Quotient (EQ) (60 item version)

For full details, please see:

S. Baron-Cohen and S. Wheelwright, (2004). The Empathy Quotient (EQ). An investigation of adults with Asperger Syndrome or High Functioning Autism, and normal sex differences. *Journal of Autism and Developmental Disorders* 34:163-175

**Responses that score 1 or 2 points are marked. Other responses score 0. For total score, sum all items.**

		strongly agree	slightly agree	slightly disagree	strongly disagree
1	I can easily tell if someone else wants to enter a conversation.	2	1	0	0
2	I prefer animals to humans.	0	0	0	0
3	I try to keep up with the current trends and fashions.	0	0	0	0
4	I find it difficult to explain to others things that I understand easily, when they don't understand it first time.	0	0	1	2
5	I dream most nights.	0	0	0	0
6	I really enjoy caring for other people.	2	1	0	0
7	I try to solve my own problems rather than discussing them with others.	0	0	0	0
8	I find it hard to know what to do in a social situation.	0	0	1	2
9	I am at my best first thing in the morning.	0	0	0	0
10	People often tell me that I went too far in driving my point home in a discussion.	0	0	1	2
11	It doesn't bother me too much if I am late meeting a friend.	0	0	1	2
12	Friendships and relationships are just too difficult, so I tend not to bother with them.	0	0	1	2
13	I would never break a law, no matter how minor.	0	0	0	0
14	I often find it difficult to judge if something is rude or polite.	0	0	1	2

		<b>strongly agree</b>	<b>slightly agree</b>	<b>slightly disagree</b>	<b>strongly disagree</b>
15	In a conversation, I tend to focus on my own thoughts rather than on what my listener might be thinking.	0	0	1	2
16	I prefer practical jokes to verbal humour.	0	0	0	0
17	I live life for today rather than the future.	0	0	0	0
18	When I was a child, I enjoyed cutting up worms to see what would happen.	0	0	1	2
19	I can pick up quickly if someone says one thing but means another.	2	1	0	0
20	I tend to have very strong opinions about morality	0	0	0	0
21	It is hard for me to see why some things upset people so much.	0	0	1	2
22	I find it easy to put myself in somebody else's shoes.	2	1	0	0
23	I think that good manners are the most important thing a parent can teach their child.	0	0	0	0
24	I like to do things on the spur of the moment.	0	0	0	0
25	I am good at predicting how someone will feel.	2	1	0	0
26	I am quick to spot when someone in a group is feeling awkward or uncomfortable.	2	1	0	0
27	If I say something that someone else is offended by, I think that that's their problem, not mine.	0	0	1	2
28	If anyone asked me if I like their haircut, I would reply truthfully, even if I didn't like it.	0	0	1	2
29	I can't always see why someone should have felt offended by a remark.	0	0	1	2

		<b>strongly agree</b>	<b>slightly agree</b>	<b>slightly disagree</b>	<b>strongly disagree</b>
30	People often tell me that I am very unpredictable.	0	0	0	0
31	I enjoy being the centre of attention at any social gathering.	0	0	0	0
32	Seeing people cry doesn't really upset me.	0	0	1	2
33	I enjoy having discussions about politics.	0	0	0	0
34	I am very blunt, which some people take to be rudeness, even though this is unintentional.	0	0	1	2
35	I don't tend to find social situations confusing	2	1	0	0
36	Other people tell me I am good at understanding how they are feeling and what they are thinking.	2	1	0	0
37	When I talk to people, I tend to talk about their experiences rather than my own.	2	1	0	0
38	It upsets me to see animals in pain.	2	1	0	0
39	I am able to make decisions without being influenced by people's feelings.	0	0	1	2
40	I can't relax until I have done everything I had planned to do that day.	0	0	0	0
41	I can easily tell if someone else is interested or bored with what I am saying.	2	1	0	0
42	I get upset if I see people suffering on news programmes.	2	1	0	0
43	Friends usually talk to me about their problems as they say I am very understanding.	2	1	0	0
44	I can sense if I am intruding, even if the other person doesn't tell me.	2	1	0	0

		<b>strongly agree</b>	<b>slightly agree</b>	<b>slightly disagree</b>	<b>strongly disagree</b>
45	I often start new hobbies but quickly become bored with them and move on to something else.	0	0	0	0
46	People sometimes tell me that I have gone too far with teasing.	0	0	1	2
47	I would be too nervous to go on a big rollercoaster.	0	0	0	0
48	Other people often say that I am insensitive, though I don't always see why.	0	0	1	2
49	If I see a stranger in a group, I think that it is up to them to make an effort to join in.	0	0	1	2
50	I usually stay emotionally detached when watching a film.	0	0	1	2
51	I like to be very organised in day to day life and often make lists of the chores I have to do.	0	0	0	0
52	I can tune into how someone else feels rapidly and intuitively.	2	1	0	0
53	I don't like to take risks.	0	0	0	0
54	I can easily work out what another person might want to talk about.	2	1	0	0
55	I can tell if someone is masking their true emotion.	2	1	0	0
56	Before making a decisions I always weigh up the pros and cons.	0	0	0	0
57	I don't consciously work out the rules of social situations.	2	1	0	0
58	I am good at predicting what someone will do.	2	1	0	0
59	I tend to get emotionally involved with a friend's problems.	2	1	0	0

		<b>strongly agree</b>	<b>slightly agree</b>	<b>slightly disagree</b>	<b>strongly disagree</b>
60	I can usually appreciate the other person's viewpoint, even if I don't agree with it.	2	1	0	0

- 0 – 32 = low (most people with Asperger Syndrome or high-functioning autism score about 20)
- 33 – 52 = average (most women score about 47 and most men score about 42)
- 53 – 63 is above average
- 64 – 80 is very high
- 80 is maximum

### 6.3 ANOVA à mesures répétées sur la performance musicale

#### Tests multivariés<sup>a</sup>

Effet	Valeur	F	ddl de l'hypothèse	Erreur ddl	Signification
Session Trace de Pillai	,954	20,714 <sup>b</sup>	4,000	4,000	,006
Lambda de Wilks	,046	20,714 <sup>b</sup>	4,000	4,000	,006
Trace de Hotelling	20,714	20,714 <sup>b</sup>	4,000	4,000	,006
Plus grande racine de Roy	20,714	20,714 <sup>b</sup>	4,000	4,000	,006

a. Plan : Constante  
Plan intrasujets : Session

b. Statistique exacte

#### Tests de sphéricité de Mauchly<sup>a</sup>

Mesure: Performance

Effet intrasujets	W de Mauchly	Khi-deux approx.	ddl	Signification	Epsilon <sup>b</sup>		
					Greenhouse-Geisser	Huynh-Feldt	Borne inférieure
Session	,048	16,446	9	,069	,465	,627	,250

Teste l'hypothèse nulle selon laquelle la matrice de covariance des erreurs des variables dépendantes orthonormées est proportionnelle à la matrice identité.

a. Plan : Constante  
Plan intrasujets : Session

b. Permet d'ajuster les degrés de liberté de la moyenne des tests de signification. Les tests corrigés sont affichés dans la table Tests des effets intrasujets.

#### Tests des effets intrasujets

Mesure: Performance

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Carré moyen	F	Signification
Session					
Hypothèse de sphéricité	51,750	4	12,937	41,879	,000
Greenhouse-Geisser	51,750	1,860	27,819	41,879	,000
Huynh-Feldt	51,750	2,506	20,648	41,879	,000
Borne inférieure	51,750	1,000	51,750	41,879	,000
Erreur (Session)					
Hypothèse de sphéricité	8,650	28	,309		
Greenhouse-Geisser	8,650	13,022	,664		
Huynh-Feldt	8,650	17,544	,493		
Borne inférieure	8,650	7,000	1,236		

#### Tests des contrastes intrasujets

Mesure: Performance

Source	Session	Somme des carrés de type III	ddl	Carré moyen	F	Signification
Session						
Linéaire		51,200	1	51,200	71,680	,000
Quadratique		,036	1	,036	,163	,699
Cubique		,112	1	,112	,663	,442
Ordre 4		,402	1	,402	3,035	,125
Erreur (Session)						
Linéaire		5,000	7	,714		
Quadratique		1,536	7	,219		
Cubique		1,188	7	,170		
Ordre 4		,927	7	,132		

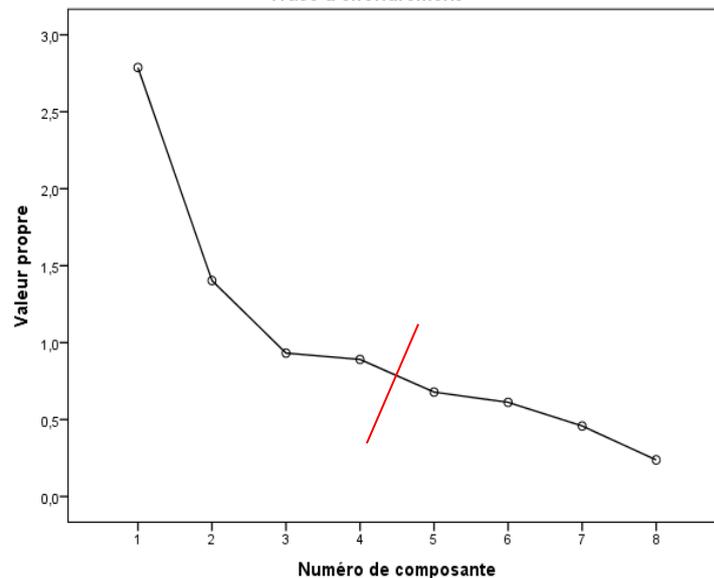
## 6.4 Analyse en composante principale

Variance totale expliquée

Composante	Valeurs propres initiales			Sommes extraites du carré des chargements			Sommes de rotation du carré des chargements		
	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé
1	2,787	34,844	34,844	2,787	34,844	34,844	1,711	21,383	21,383
2	1,403	17,542	52,385	1,403	17,542	52,385	1,672	20,899	42,282
3	,932	11,648	64,033	,932	11,648	64,033	1,399	17,489	59,770
4	,891	11,134	75,167	,891	11,134	75,167	1,232	15,397	75,167
5	,679	8,482	83,649						
6	,612	7,650	91,299						
7	,458	5,727	97,025						
8	,238	2,975	100,000						

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

Tracé d'effondrement



Dans le choix du nombre de composantes à extraire, nous avons un critère de variance expliquée (>75%), en désaccord avec une valeur propre au moins égale à un, mais en accord avec le critère du "coude" (en rouge).

Rotation de la matrice des composantes<sup>a</sup>

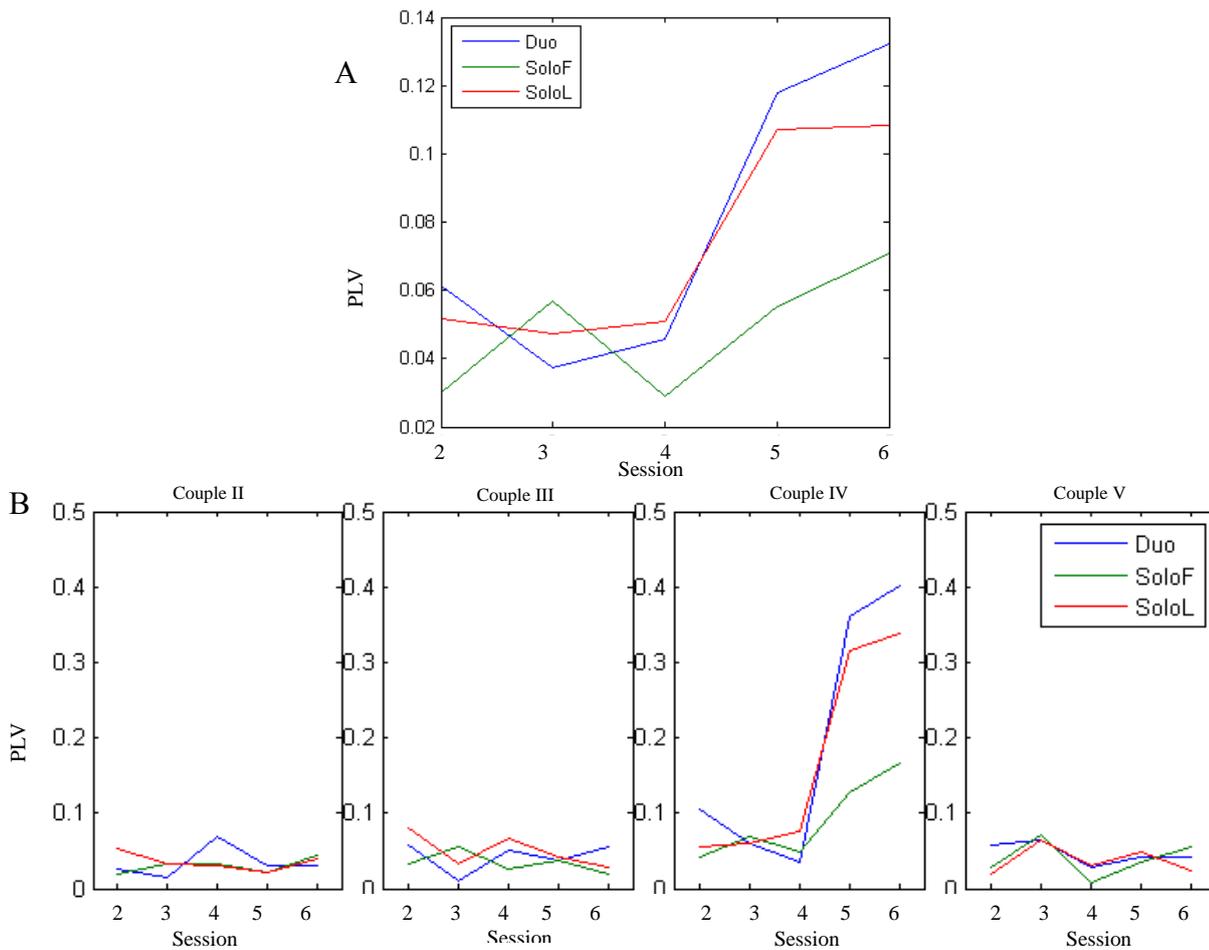
	Composante			
	1	2	3	4
Proximité	,816			
Communication	,777			
TechDuo	-,573	-,452	,342	
QualDuo		,845		
QualSolo		,841		
TechSolo			,888	
Enjoy			,665	-,537
MisePlace				,898

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

Méthode de rotation : Varimax avec normalisation Kaiser.<sup>a</sup>

a. Convergence de la rotation dans 5 itérations.

## 6.5 Résultats de la synchronisation cérébrale en EEG avec la PLV, Duo vs Solo

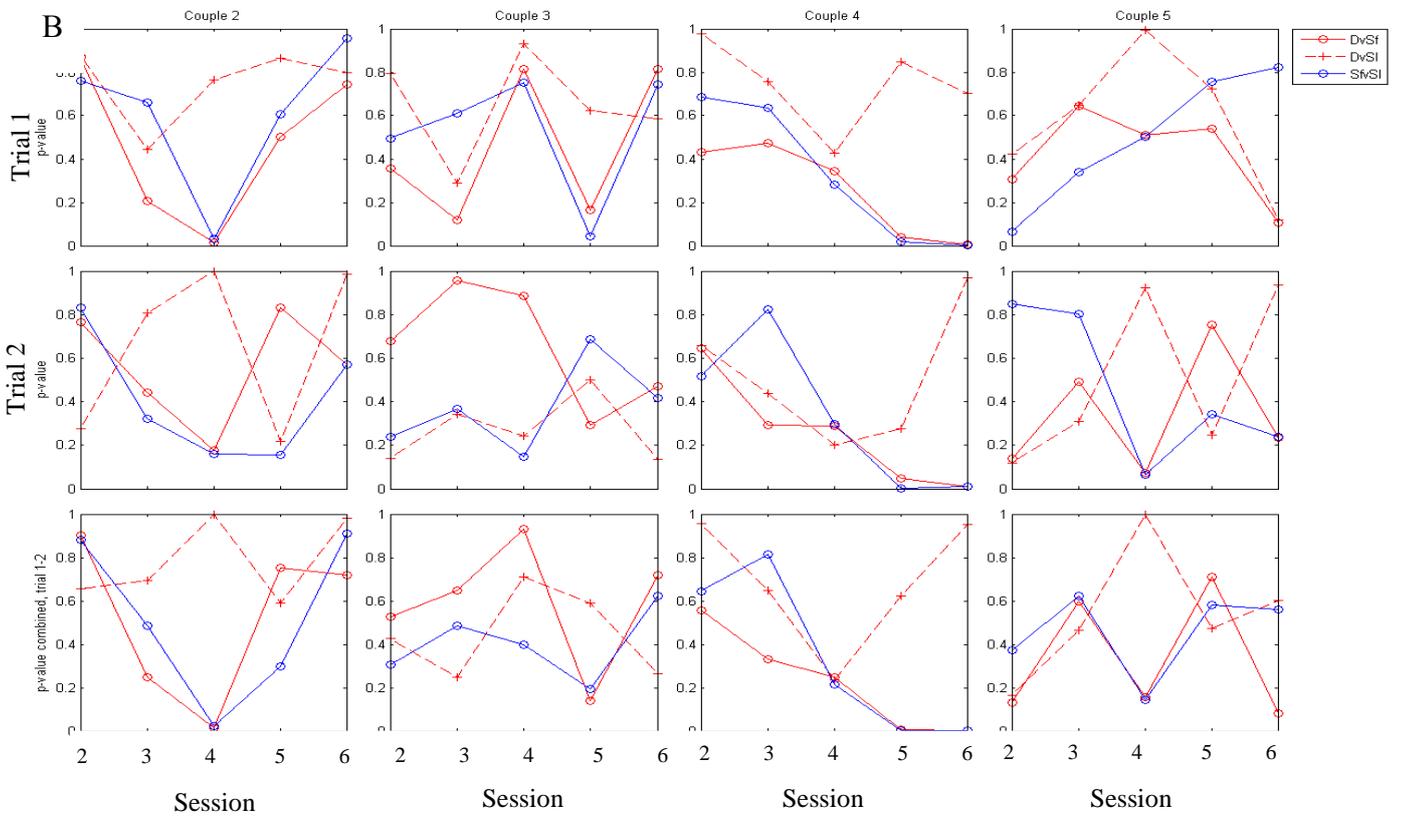
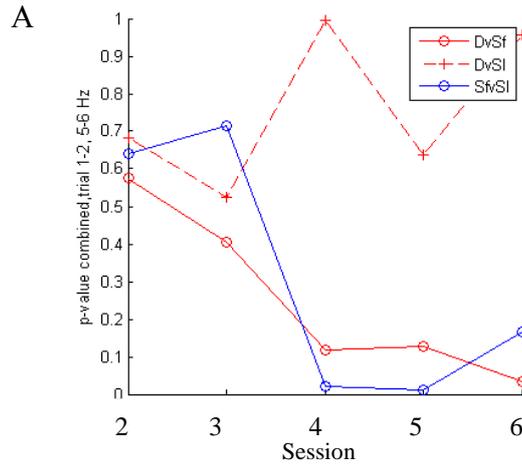


**PLV calculée sur les sources sélectionnées en fonction de chaque session, selon chaque condition expérimentale.**

(A) Moyenne de la PLV calculée sur chaque duo en fonction des sessions et des conditions expérimentales (Bleu : Duo ; Rouge : Solo-leader ; Vert : Solo-follower). Globalement, la cohérence semble plus élevée dans les sessions 5 et 6.

(B) Moyenne de la PLV calculée pour chaque duo sur les deux essais en fonction des sessions et des conditions de l'expérience. Nous remarquons que le duo n°IV possède la plus grande augmentation de cohérence sur les deux dernières sessions.

Nous mettons en évidence une tendance à l'augmentation de la significativité au cours du temps pour la comparaison Duo et Solo-follower ( $r(3) = -.940$ ,  $p < .05$ ), mais aucune pour la comparaison Duo et Solo-leader, ni Solo-follower et Solo-leader.



**Valeurs  $p$  issues des comparaisons et tests de permutation entre conditions contrôles et expérimentales en fonction des sessions.**

**(A)** Combinaison totale des valeurs  $p$  entre tous les duos en fonction des sessions et selon les comparaisons de conditions. En rouge sont les comparaisons entre condition expérimentale (Duo) et conditions contrôles (Solo). En trait plein il s'agit de Solo-follower et en pointillé Solo-leader. En bleu est la comparaison entre les deux conditions contrôles (Solo). Nous remarquons que la significativité de Duo vs Solo-follower et Solo-leader vs Solo-follower augmente avec le temps (valeur  $p$  qui diminue) sans pour autant atteindre le seuil de significativité corrigé ( $p = 0.0167$ ) à la session 6 pour l'un ou l'autre ( $p = 0.034$  ;  $p = 0.167$ ).

**(B)** Valeurs  $p$  de chaque duo pour chaque session et chaque comparaison de condition sur chaque trial. La dernière ligne correspond à la combinaison des valeurs  $p$  obtenues sur les deux trials. Le duo n°IV montre une différence flagrante par rapport aux autres groupes au niveau des sessions 5 et 6. En effet, la combinaison des valeurs  $p$  est très inférieure au seuil corrigé ( $p << 0.0167$ ). Aucun des autres duos n'atteignent de telles valeurs.

## 6.6 Analyses de la puissance des sources en intra-individu, Duo vs Solo

### Trial 1

#### Tests de sphéricité de Mauchly<sup>a</sup>

Mesure: Power

Effet intrasujets	W de Mauchly	Khi-deux approx.	ddl	Signification	Epsilon <sup>b</sup>		
					Greenhouse-Geisser	Huynh-Feldt	Borne inférieure
Session	,274	7,006	9	,653	,694	1,000	,250
Condition	,796	1,368	2	,505	,831	1,000	,500
Session * Condition	,000	.	35	.	,286	,432	,125

Teste l'hypothèse nulle selon laquelle la matrice de covariance des erreurs des variables dépendantes orthonormées est proportionnelle à la matrice identité.

a. Plan : Constante

Plan intrasujets : Session + Condition + Session \* Condition

b. Permet d'ajuster les degrés de liberté de la moyenne des tests de signification. Les tests corrigés sont affichés dans la table Tests des effets intrasujets.

#### Tests des effets intrasujets

Mesure: Power

Source		Somme des carrés de type III	ddl	Carré moyen	F	Signification	Eta-carré partiel
Session	Hypothèse de sphéricité	5,193	4	1,298	1,163	,348	,142
	Greenhouse-Geisser	5,193	2,775	1,871	1,163	,347	,142
	Huynh-Feldt	5,193	4,000	1,298	1,163	,348	,142
	Borne inférieure	5,193	1,000	5,193	1,163	,317	,142
Erreur (Session)	Hypothèse de sphéricité	31,249	28	1,116			
	Greenhouse-Geisser	31,249	19,424	1,609			
	Huynh-Feldt	31,249	28,000	1,116			
	Borne inférieure	31,249	7,000	4,464			
Condition	Hypothèse de sphéricité	1,271	2	,635	2,203	,147	,239
	Greenhouse-Geisser	1,271	1,661	,765	2,203	,159	,239
	Huynh-Feldt	1,271	2,000	,635	2,203	,147	,239
	Borne inférieure	1,271	1,000	1,271	2,203	,181	,239
Erreur (Condition)	Hypothèse de sphéricité	4,039	14	,288			
	Greenhouse-Geisser	4,039	11,629	,347			
	Huynh-Feldt	4,039	14,000	,288			
	Borne inférieure	4,039	7,000	,577			
Session * Condition	Hypothèse de sphéricité	,174	8	,022	,122	,998	,017
	Greenhouse-Geisser	,174	2,287	,076	,122	,908	,017
	Huynh-Feldt	,174	3,458	,050	,122	,961	,017
	Borne inférieure	,174	1,000	,174	,122	,737	,017
Erreur (Session*Condition)	Hypothèse de sphéricité	9,944	56	,178			
	Greenhouse-Geisser	9,944	16,009	,621			
	Huynh-Feldt	9,944	24,203	,411			
	Borne inférieure	9,944	7,000	1,421			

## Trial 2

### Tests de sphéricité de Mauchly<sup>a</sup>

Mesure: Power

Effet intrasujets	W de Mauchly	Khi-deux approx.	ddl	Signification	Epsilon <sup>b</sup>		
					Greenhouse-Geisser	Huynh-Feldt	Borne inférieure
Session	,282	6,849	9	,669	,639	1,000	,250
Condition	,895	,668	2	,716	,905	1,000	,500
Session * Condition	,000	.	35	.	,500	1,000	,125

Teste l'hypothèse nulle selon laquelle la matrice de covariance des erreurs des variables dépendantes orthonormées est proportionnelle à la matrice identité.

a. Plan : Constante

Plan intrasujets : Session + Condition + Session \* Condition

b. Permet d'ajuster les degrés de liberté de la moyenne des tests de signification. Les tests corrigés sont affichés dans la table Tests des effets intrasujets.

### Tests des effets intrasujets

Mesure: Power

Source		Somme des carrés de type III	ddl	Carré moyen	F	Signification	Eta-carré partiel
Session	Hypothèse de sphéricité	4,998	4	1,250	1,061	,394	,132
	Greenhouse-Geisser	4,998	2,557	1,955	1,061	,381	,132
	Huynh-Feldt	4,998	4,000	1,250	1,061	,394	,132
	Borne inférieure	4,998	1,000	4,998	1,061	,337	,132
Erreur (Session)	Hypothèse de sphéricité	32,965	28	1,177			
	Greenhouse-Geisser	32,965	17,896	1,842			
	Huynh-Feldt	32,965	28,000	1,177			
	Borne inférieure	32,965	7,000	4,709			
Condition	Hypothèse de sphéricité	1,635	2	,818	3,264	,069	,318
	Greenhouse-Geisser	1,635	1,809	,904	3,264	,076	,318
	Huynh-Feldt	1,635	2,000	,818	3,264	,069	,318
	Borne inférieure	1,635	1,000	1,635	3,264	,114	,318
Erreur (Condition)	Hypothèse de sphéricité	3,507	14	,250			
	Greenhouse-Geisser	3,507	12,666	,277			
	Huynh-Feldt	3,507	14,000	,250			
	Borne inférieure	3,507	7,000	,501			
Session * Condition	Hypothèse de sphéricité	,284	8	,035	,213	,987	,030
	Greenhouse-Geisser	,284	3,998	,071	,213	,929	,030
	Huynh-Feldt	,284	8,000	,035	,213	,987	,030
	Borne inférieure	,284	1,000	,284	,213	,658	,030
Erreur (Session*Condition)	Hypothèse de sphéricité	9,319	56	,166			
	Greenhouse-Geisser	9,319	27,988	,333			
	Huynh-Feldt	9,319	56,000	,166			
	Borne inférieure	9,319	7,000	1,331			

## 6.7 Fonctions de combinaison de valeur p

Dans la littérature, il existe plusieurs fonctions de combinaison, comme la méthode de Fisher (Fisher, 1925) ou celle de Edgington (Edgington, 1972). Dans notre expérience, nous utilisons une fonction de combinaison Gaussienne selon laquelle :

$$G = \frac{\sum z(p)}{\sqrt{N}}$$

Où  $z(p)$  est la transformé  $z$  d'une valeur  $p$  et  $N$  le nombre de  $p$ -value combinées (Stouffer et al., 1949).

## 6.8 Analyses de la puissance des sources en intra-individu, HQ vs NQ

### Trial 1

#### Tests de sphéricité de Mauchly<sup>a</sup>

Mesure: Power

Effet intrasujets	W de Mauchly	Khi-deux approx.	ddl	Signification	Epsilon <sup>b</sup>		
					Greenhouse-Geisser	Huynh-Feldt	Borne inférieure
Session	,091	12,965	9	,182	,532	,771	,250
Condition	1,000	,000	0	.	1,000	1,000	1,000
Session * Condition	,272	7,055	9	,648	,694	1,000	,250

Teste l'hypothèse nulle selon laquelle la matrice de covariance des erreurs des variables dépendantes orthonormées est proportionnelle à la matrice identité.

a. Plan : Constante

Plan intrasujets : Session + Condition + Session \* Condition

b. Permet d'ajuster les degrés de liberté de la moyenne des tests de signification. Les tests corrigés sont affichés dans la table

Tests des effets intrasujets.

#### Tests des effets intrasujets

Mesure: Power

Source		Somme des carrés de type III	ddl	Carré moyen	F	Signification	Eta-carré partiel
Session	Hypothèse de sphéricité	,876	4	,219	,848	,507	,108
	Greenhouse-Geisser	,876	2,128	,412	,848	,454	,108
	Huynh-Feldt	,876	3,084	,284	,848	,485	,108
	Borne inférieure	,876	1,000	,876	,848	,388	,108
Erreur (Session)	Hypothèse de sphéricité	7,231	28	,258			
	Greenhouse-Geisser	7,231	14,895	,485			
	Huynh-Feldt	7,231	21,585	,335			
	Borne inférieure	7,231	7,000	1,033			
Condition	Hypothèse de sphéricité	3,285	1	3,285	7,495	,029	,517
	Greenhouse-Geisser	3,285	1,000	3,285	7,495	,029	,517
	Huynh-Feldt	3,285	1,000	3,285	7,495	,029	,517
	Borne inférieure	3,285	1,000	3,285	7,495	,029	,517
Erreur (Condition)	Hypothèse de sphéricité	3,068	7	,438			
	Greenhouse-Geisser	3,068	7,000	,438			
	Huynh-Feldt	3,068	7,000	,438			
	Borne inférieure	3,068	7,000	,438			
Session * Condition	Hypothèse de sphéricité	3,072	4	,768	3,379	,022	,326
	Greenhouse-Geisser	3,072	2,775	1,107	3,379	,042	,326
	Huynh-Feldt	3,072	4,000	,768	3,379	,022	,326
	Borne inférieure	3,072	1,000	3,072	3,379	,109	,326
Erreur (Session*Condition)	Hypothèse de sphéricité	6,366	28	,227			
	Greenhouse-Geisser	6,366	19,428	,328			
	Huynh-Feldt	6,366	28,000	,227			
	Borne inférieure	6,366	7,000	,909			

## Trial 2

### Tests de sphéricité de Mauchly<sup>a</sup>

Mesure: Power

Effet intrasujets	W de Mauchly	Khi-deux approx.	ddl	Signification	Epsilon <sup>b</sup>		
					Greenhouse-Geisser	Huynh-Feldt	Borne inférieure
Session	,227	8,031	9	,551	,523	,750	,250
Condition	1,000	,000	0	.	1,000	1,000	1,000
Session * Condition	,251	7,495	9	,604	,598	,930	,250

Teste l'hypothèse nulle selon laquelle la matrice de covariance des erreurs des variables dépendantes orthonormées est proportionnelle à la matrice identité.

a. Plan : Constante

Plan intrasujets : Session + Condition + Session \* Condition

b. Permet d'ajuster les degrés de liberté de la moyenne des tests de signification. Les tests corrigés sont affichés dans la table Tests des effets intrasujets.

### Tests des effets intrasujets

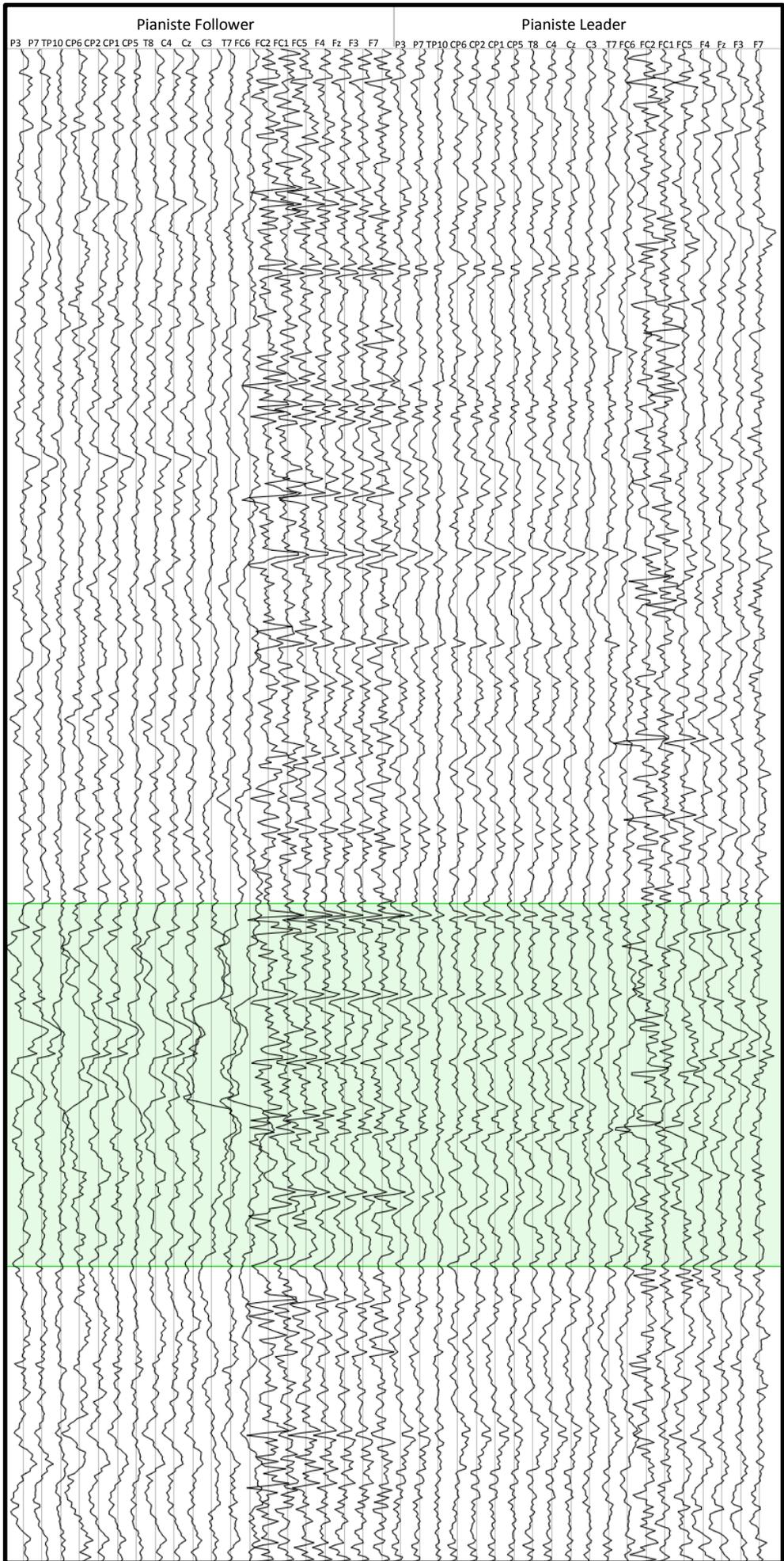
Mesure: Power

Source		Somme des carrés de type III	ddl	Carré moyen	F	Signification	Eta-carré partiel
Session	Hypothèse de sphéricité	,236	4	,059	,187	,943	,026
	Greenhouse-Geisser	,236	2,091	,113	,187	,840	,026
	Huynh-Feldt	,236	3,000	,079	,187	,904	,026
	Borne inférieure	,236	1,000	,236	,187	,678	,026
Erreur (Session)	Hypothèse de sphéricité	8,827	28	,315			
	Greenhouse-Geisser	8,827	14,637	,603			
	Huynh-Feldt	8,827	21,000	,420			
	Borne inférieure	8,827	7,000	1,261			
Condition	Hypothèse de sphéricité	3,693	1	3,693	6,961	,034	,499
	Greenhouse-Geisser	3,693	1,000	3,693	6,961	,034	,499
	Huynh-Feldt	3,693	1,000	3,693	6,961	,034	,499
	Borne inférieure	3,693	1,000	3,693	6,961	,034	,499
Erreur (Condition)	Hypothèse de sphéricité	3,714	7	,531			
	Greenhouse-Geisser	3,714	7,000	,531			
	Huynh-Feldt	3,714	7,000	,531			
	Borne inférieure	3,714	7,000	,531			
Session * Condition	Hypothèse de sphéricité	2,430	4	,608	2,103	,107	,231
	Greenhouse-Geisser	2,430	2,392	1,016	2,103	,147	,231
	Huynh-Feldt	2,430	3,719	,653	2,103	,113	,231
	Borne inférieure	2,430	1,000	2,430	2,103	,190	,231
Erreur (Session*Condition)	Hypothèse de sphéricité	8,090	28	,289			
	Greenhouse-Geisser	8,090	16,746	,483			
	Huynh-Feldt	8,090	26,036	,311			
	Borne inférieure	8,090	7,000	1,156			

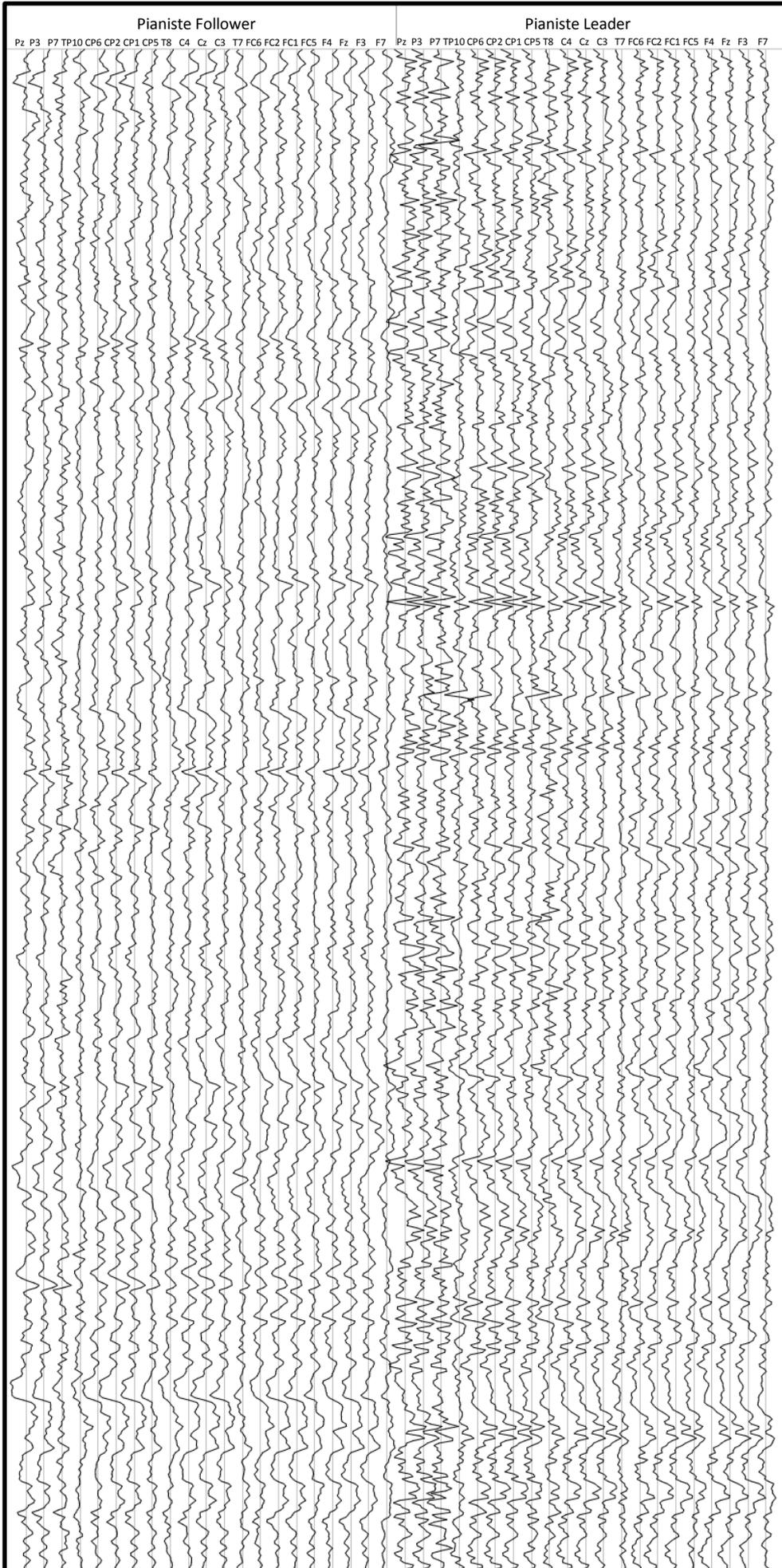
## 6.9 Echantillon des tracés EEG

Dans les pages suivantes, nous présentons des échantillons représentatifs des tracés EEG enregistrés lors des différentes sessions de l'expérience. Il s'agit à chaque fois de la condition expérimentale Duo. Les périodes en vert sur certains tracés représentent des artéfacts qui n'ont pas été pris en compte lors de l'analyse. Les tracés font 640 échantillons, soit cinq secondes.

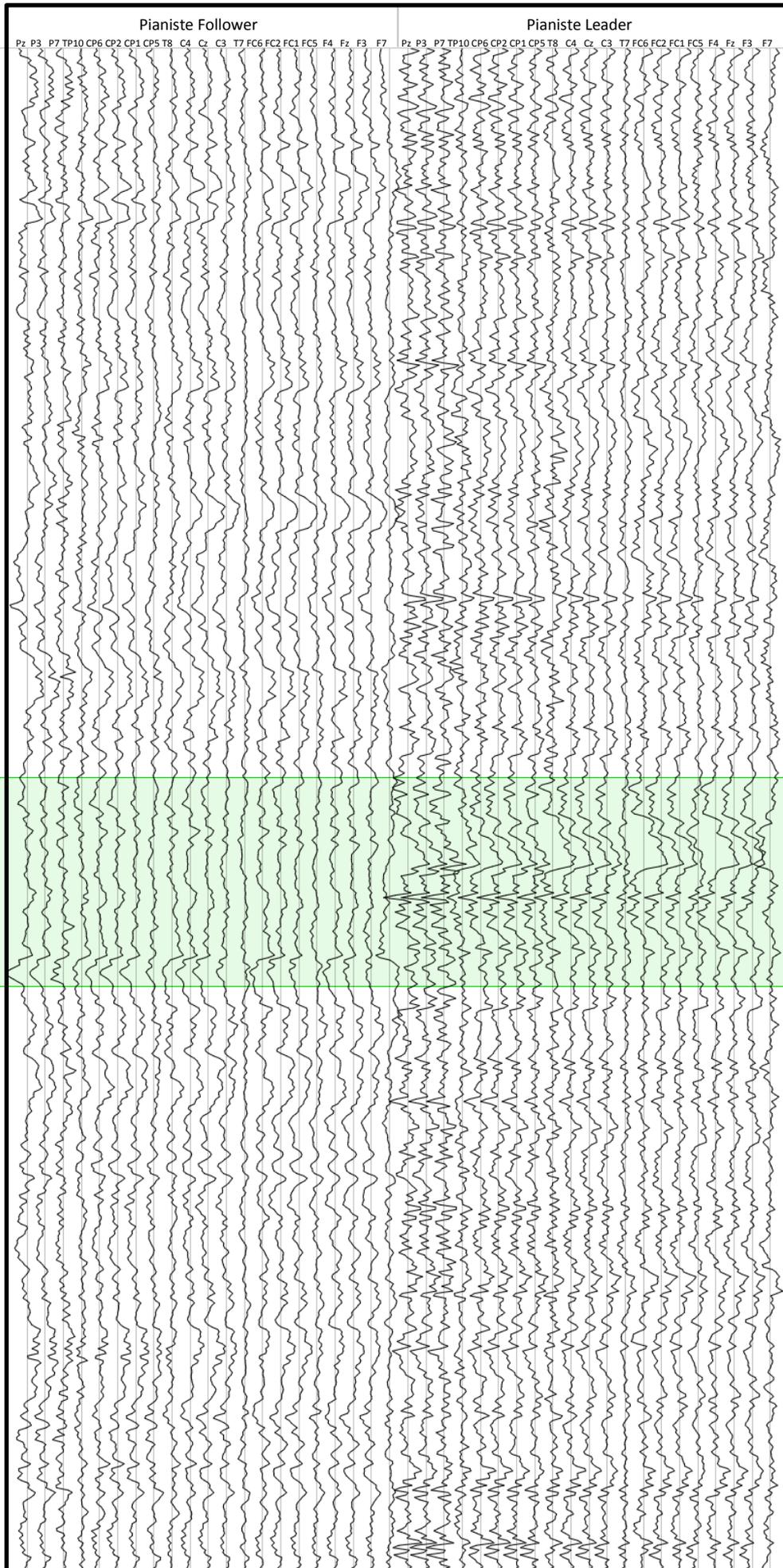
Session 2



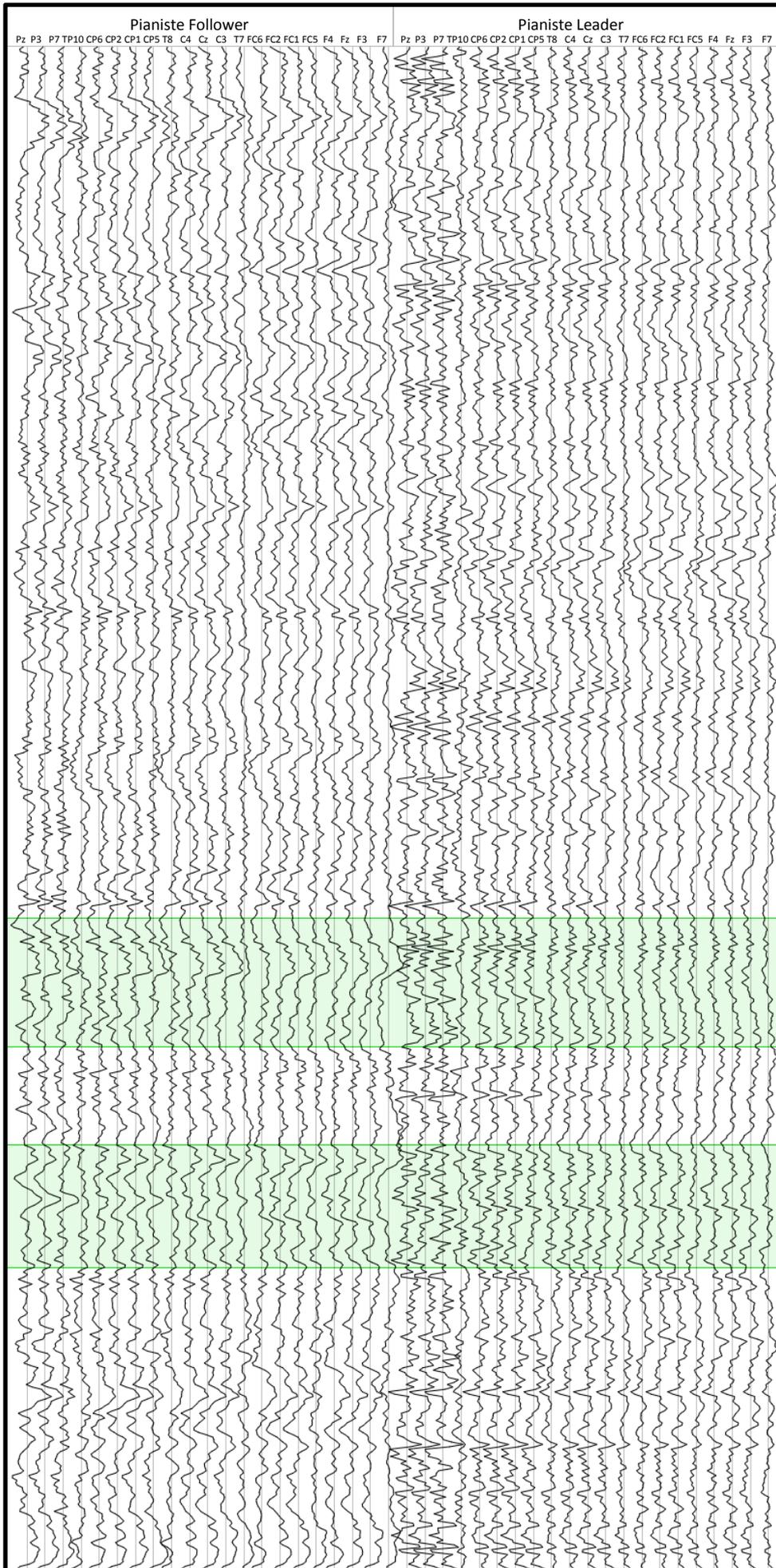
Session 3



Session 4



Session 5



### **6.10 Echantillon des tracés des sources non filtrées et filtrées, avec la cohérence calculée au cours du temps**

Dans les pages suivantes, nous présentons le tracé des sources brutes et filtrées entre 4-7Hz, avec la cohérence calculée au cours du temps. Les lignes vertes verticales représentent des occurrences de synchronisation choisies arbitrairement. On remarque qu'elles sont plus nombreuses dans les sessions 5 et 6 par rapport aux sessions 2, 3 et 4. Les tracés font 640 échantillons, soit cinq secondes.

