

# Analyse des corrélats cérébraux dans la synchronie communicative entre sujets

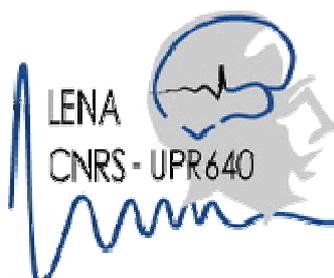
Rapport de Master 2 Recherche

Étudiant :

Guillaume Dumas

Directrices :

Line Garnero (UPR 640) & Jacqueline Nadel (UMR 7593)



Laboratoire de  
Neurosciences Cognitives  
& Imagerie Cérébrale

*« When people are free to do as they please, they usually imitate each other »*

*Eric Hoffer*

(1902 -1983)

The passionate State of Mind, 1955

# Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Line Garnero et Jacqueline Nadel pour leur encadrement, tant au niveau scientifique qu'humain. Je voudrais également remercier toute l'équipe du projet: Jacques Martinerie pour sa manière de répondre à mes interrogations en me guidant dans mes inspirations, Robert Sousignan pour l'aide qu'il m'a apportée concernant l'analyse comportementale, Arnaud Revel, Pierre Canet et Laurent Hugueville qui m'ont conseillé et aidé sur le plan technique et Florence Bouchet qui m'a initié aux techniques EEG. Je tiens à remercier particulièrement Nathalie George qui va bientôt accoucher et qui malgré sa grossesse a toujours pris le temps pour répondre à mes questions. J'estime avoir eu la chance d'avoir une équipe projet qui a su me conseiller de manière précise dans les différents domaines impliqués dans ce projet tout en m'encadrant lors des prises de décision.

Mes remerciements vont également à tout le reste de l'équipe du LENA, en particulier toute la communauté étudiante qui s'efforce de développer un esprit d'entraide et de cohésion: Guillaume, Benoît, Anaël, Sheraz, Charles, Luc, Gaëtan, Michel, Rémi, Yohan, Manik, Florence, Julien, Valentin, Max, Agnès, Shasha, Lucile, Florence.

Merci à Mario pour son précieux soutien.

Merci à Audrey pour tout.

Et enfin, je tiens à remercier bien sur tous les sujets qui ont passé ces expériences et ainsi contribué au bon avancement de ce projet.

# Sommaire

<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>5</b>
1.1.	Objectifs.....	5
1.2.	État de l'art .....	5
1.3.	Hypothèses.....	7
<b>2.</b>	<b>MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>8</b>
2.1.	Description du dispositif expérimental .....	8
2.2.	Participants .....	9
2.3.	Protocole expérimental.....	9
2.4.	Traitement de données .....	11
<b>3.</b>	<b>RESULTATS COMPORTEMENTAUX .....</b>	<b>17</b>
3.1.	Répartition des différents types d'interaction.....	17
3.2.	Turn-taking.....	17
<b>4.</b>	<b>RESULTATS ELECTROPHYSIOLOGIQUES .....</b>	<b>20</b>
4.1.	Etude temps-fréquence.....	20
4.2.	Synchronies de phase.....	25
<b>5.</b>	<b>DISCUSSION.....</b>	<b>26</b>
5.1.	Discussion des résultats comportementaux .....	26
5.2.	Discussion des résultats électrophysiologiques.....	26
<b>6.</b>	<b>PERSPECTIVES .....</b>	<b>28</b>
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>29</b>

# 1. Introduction

## 1.1. Objectifs

Les synchronies sont des phénomènes présents à toutes les échelles observables scientifiquement. Pourtant, des atomes aux balais cosmiques des planètes, ces apparitions d'ordre soudain semblent contredire la dégénérescence inévitable édictée par les lois de la thermodynamique. Au sein des sciences cognitives, elles sont également présentes.

Les synchronies comportementales sont visibles dans la vie quotidienne: lorsqu'un enfant et sa mère marchent d'un même pas, ou encore, pour un nombre plus important de personnes, quand les mains battent à l'unisson à la fin d'un spectacle. Jacqueline Nadel et son équipe du Centre Emotion à l'hôpital de la Salpêtrière ont étudié ce phénomène chez le bébé au cours d'échanges sociaux dyadiques et montré qu'il était décelable dès le deuxième mois (Nadel 1999; Soussignan 2006)

Les synchronies neurales bien que non observables directement n'en restent pas moins omniprésentes. Depuis les premières études de Gray et Singer sur les synchronies dans le cortex visuel du chat (Gray, Konig et al. 1989), elles ne cessent de compléter le spectre des outils d'analyse des processus cognitifs. Le LENA a notamment contribué à l'étude de la synchronie de phase dont le spectre d'utilisation va du problème d'intégration à large échelle à celui du liage perceptif ou «binding problem». Bien que les faits expérimentaux s'accumulent, ils restent pour le moment insuffisants pour confirmer le rôle causal de la synchronie dans la cognition. Toutefois, les outils développés en font à présent un indicateur dynamique puissant et robuste dans l'étude des processus cognitifs.

Dans le cadre de ce projet, nous nous sommes intéressés à analyser les relations que les synchronies peuvent entretenir entre plusieurs échelles d'études : celles des synchronies communicatives au niveau comportemental et celles des synchronies de phase au niveau des populations neuronales. Nous proposons une nouvelle approche qui considère les sujets comme un système complet unique et interpersonnel, en utilisant un enregistrement EEG simultané de plusieurs sujets. Elle a une visée exploratoire sur les phénomènes d'interaction humaine dans un cadre holistique par l'emploi de nouvelles techniques d'imagerie et la coopération entre la psychologie comportementale et la neurodynamique. Elle fait suite à des expériences-pilotes réalisées en début d'année et ayant pour but l'élaboration d'un protocole expérimental nouveau intégrant ces différents aspects. Ces aspects ont été abordés dans le cadre d'un protocole expérimental précis qui est celui de l'imitation.

## 1.2. État de l'art

### 1.2.1. Études des interactions sociales

Le domaine des sciences cognitives explore de plus en plus le champ élargi des interactions sociales entre individus. Or si de nombreux progrès ont été faits sur la compréhension des bases neurales de la cognition individuelle, et en particulier sur le rôle de la synchronisation entre populations de neurones dans les comportements perceptifs, moteurs ou cognitifs, nous avons peu de connaissances sur les processus neuronaux qui sous-tendent la régulation et la synchronisation de nos échanges interpersonnels. Ceci tient à la difficulté expérimentale qui nécessite d'enregistrer simultanément plusieurs sujets en interaction.

La majorité des paradigmes d'exploration des interactions sociales en Neuroimagerie n'implique qu'un seul sujet ou alors plusieurs sujets, mais un seul de ces sujets est scanné à la fois. Il est donc nécessaire de relier alors l'activité au comportement de l'autre, qui n'est pas toujours chose aisée, et qui de plus n'est qu'une façon indirecte de considérer l'activité cérébrale réelle de l'autre participant. Réaliser des enregistrements simultanés entre des sujets en interaction est donc un impératif de ces explorations, et permet ainsi d'étudier directement les couplages entre cerveaux. Peu d'études dans ce sens ont été publiées, Read Montague et ses collègues ont posé les bases de ces nouveaux enregistrements, qu'ils ont intitulé « Hyperscanning » et ont mis en évidence des premiers couplages entre cerveaux dans une tâche relevant de la théorie des jeux (Montague,

Berns et al. 2002). Hasson et al, (Hasson, Furman et al. 2008) ont ensuite montré, par des enregistrements IRMf couplés, des synchronisations entre l'activité de deux sujets alors que ceux-ci regardent simultanément le même film. Cependant, la technique d'IRMf ne permet pas d'avoir accès à la dynamique précise de ces couplages, que permettent l'exploration en EEG et/ou MEG. A notre connaissance, seulement deux expériences d'hyperscanning ont été réalisées en EEG. Une première sur un ensemble de quatre joueurs de carte (Babiloni, Cincotti et al. 2006), mais le faible contrôle comportemental n'a pas permis d'en extraire des résultats solides, et d'autre part les auteurs n'ont pas regardé directement des synchronisations entre sujets mais ont juxtaposé les résultats des analyses individuelles. Une seconde étude, réalisé par Emmanuelle Tognoli et Al. (Tognoli, Lagarde et al. 2007) se rapproche plus de notre étude : elle utilise un système dual-EEG et analyse les corrélats neuronaux de la synchronie sociale. Ses résultats mettent en évidence un marqueur neuronal appelé Phi situé dans la bande des fréquences 10-13Hz et situé au niveau du cortex centro-parietal. Ce marqueur est divisé en deux composantes l'une favorisant les comportements individuels, l'autre favorisant la coordination entre les personnes. Toutefois, cette étude utilise une tâche de tapping et l'espace d'interaction est extrêmement restreint.

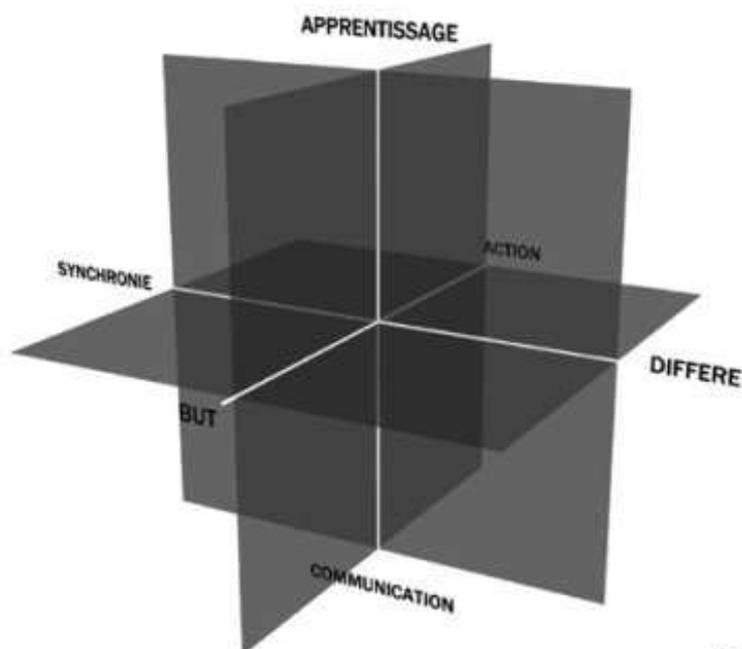
D'autres études plus comportementales s'intéressent à la synchronie communicative. Les travaux de Oullier (Oullier, de Guzman et al. 2007) ou Issartel (Issartel, Marin et al. 2006) proposent de nouvelles approches d'analyse de ce phénomène. L'emploi d'outils mathématiques, comme la transformée ondelettes croisée, appliqués aux paramètres des boucles perception-action rendent compte du phénomène de contamination sociale par la synchronisation ou encore de l'apparition par émergence de paramètres moteur non-plus individuels mais relatifs à la dyade en interaction. Pourtant, aucun pont n'a été lancé afin de relier ce phénomène à celui des synchronisations neurales. Toutefois, on sait que la synchronisation joue un rôle important dans l'émergence de comportements cognitifs et un axe de recherche important en neurosciences consiste à étudier comment les neurones interagissent entre eux. En effet, dans le cerveau, comme dans tout réseau, la performance dépend de la coordination entre les différents éléments qui le composent. Pour reprendre une analogie publiée il y a quelques années (Varela, Lachaux et al. 2001), les interactions neuronales à large-échelle sont comparables à celles permettant à des ordinateurs d'échanger des données dans les systèmes 'peer-to-peer'. Pour cela, de nombreuses méthodes d'estimation de ces interactions à partir d'enregistrements EEG ont été développées. Celles-ci s'appuient sur des analyses linéaires de corrélation temporelle ou de cohérence dans différentes bandes de fréquence (Maris, Schoffelen et al. 2007) ou des méthodes non linéaires telles que la synchronisation de phase entre deux signaux dans des bandes de fréquence spécifiques (Lachaux, Rodriguez et al. 1999).

### **1.2.2. L'imitation comme paradigme de synchronisation comportementale**

Des études développementales récentes ont démontré la capacité précocissime de détection de la synchronie interactive : l'introduction d'un délai dans la boucle d'interaction entre un bébé et sa mère engendre une rupture de la communication en cours (Murray 1985; Nadel 1999; Legerstee 2001; Bigelow 2003; Stormack 2004; Nadel 2005; Soussignan 2006).

Ces résultats suggèrent une capacité humaine intrinsèque à percevoir et produire une activité synchronisée avec celle d'autrui. L'imitation immédiate est un exemple presque parfait de synchronie interactive (Gergely 1999). Dans l'émergence de cette synchronie, il a été proposé que des couplages neuronaux interindividuels gouvernent la dynamique des échanges et des synchronisations inter-individuels au niveau comportemental (Wilson and Wilson 2005). Des approche par modélisation tendent à montrer que ce phénomène de turn-taking serait émergeant de la synchronie elle-même (Ikegami and Morimoto 2003; Ikegami 2007; Ikegami and Iizuka 2007).

L'imitation dite spontanée est un cas d'étude idéal pour observer ce phénomène, elle présente toutes les caractéristiques de l'interaction sociale et conduit à des phases de synchronies comportementales. Dans l'espace varié de l'imitation, elle se situe d'un point de vue temporel dans la synchronie, d'un point de vue fonctionnel dans la communication et a pour objet l'action et non son but (Voir figure 1 à la page suivante)



(Prépin, 2008)

**Figure 1 : L'imitation : espace varié pour une définition multiple. Trois axes, la structure temporelle (de l'imitation différée à l'imitation synchrone), la fonctionnalité (de la communication à l'apprentissage), l'objet (de l'action au but de l'action). (Prépin 2008)**

### **1.3. Hypothèses**

L'hypothèse principale est qu'il existe des corrélats cérébraux intra et inter sujet lors de la synchronie communicative. Elle cherche à dépasser le paradigme maintenant classique des neurones miroir afin d'intégrer une dimension de couplage entre les sujets. Pour cela nous utiliserons un enregistrement couplé EEG de deux sujets lors d'une tâche d'imitation et quantifieront le signal EEG par une analyse spectrale de ses puissances dans les différentes bandes de fréquences et par l'estimation des synchronisations de phase intra et inter sujet.

Dans ce cadre, nos hypothèses sont qu'il y existera une modification des oscillations dans les bandes de fréquences Mu et Beta (dont on connaît l'implication dans les comportements moteurs) en fonction des différentes caractéristiques comportementales de l'imitation :

1. une synchronisation gestuelle dans l'imitation devrait être corrélée avec une augmentation de la puissance dans ces bandes de fréquences ainsi que des synchronies dans le cortex sensorimoteur.
2. l'imitation devrait s'accompagner de changements dans l'activité des lobes pariétaux ainsi que dans la SMA du fait de son implication dans la planification du mouvement et la coordination des gestes bi-manuels (Toyokura, Muro et al. 2002)

De plus, au niveau comportemental, nous nous attendons à avoir beaucoup de synchronies avec délai ou en phase. Le problème des retards de phase n'est pas encore considéré pour le moment.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Description du dispositif expérimental

Nous avons eu recours à un double enregistrement, vidéo et EEG, de deux sujets en interaction afin de permettre les analyses conjointes comportementales et neurodynamiques.

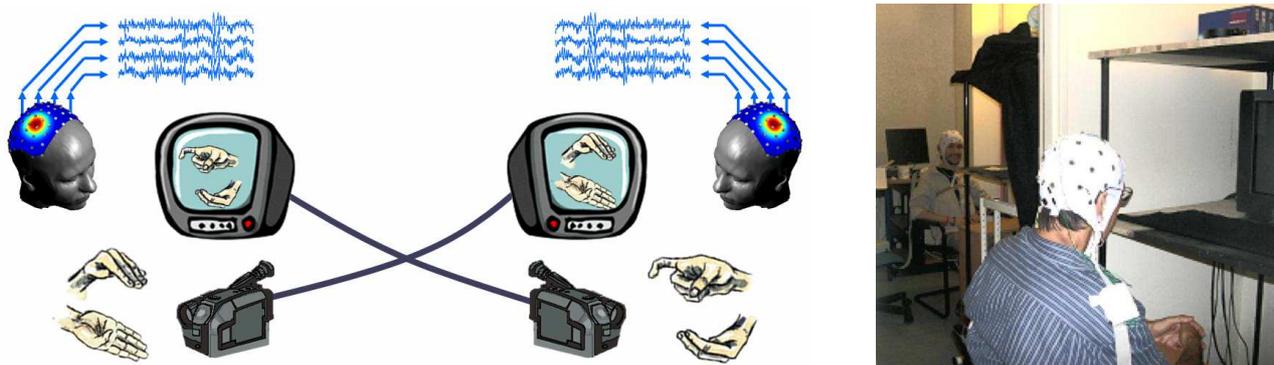


Figure 2: Schéma du système expérimental (à gauche) et photo d'une expérience pilote (à droite)

La plateforme expérimentale développée par l'équipe de Jacqueline Nadel permet une étude comportementale contrôlée de l'imitation et un dispositif de « dual EEG » a été adapté afin de procéder à un enregistrement synchronisé des vidéos et des signaux électrophysiologiques.

#### 2.1.1. Système dual vidéo

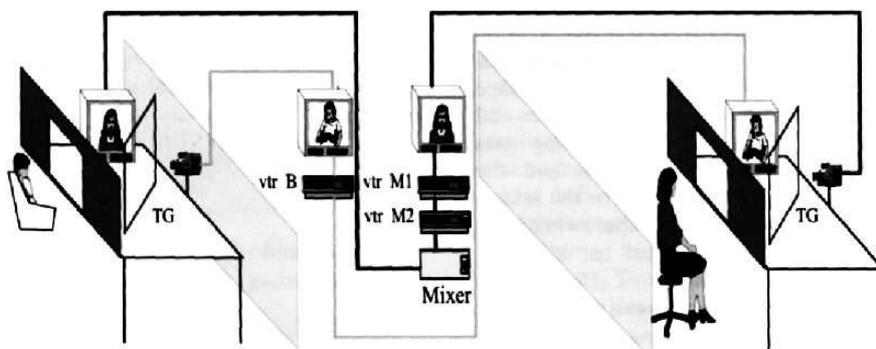


Figure 3: Système original de double vidéo (Nadel 1999).

Le dispositif est composé de 2 téléprompteurs reliés et synchronisés via un système informatisé, le tout installé dans 3 cabines. Les couples de sujets s'installent chacun dans une des cabines d'où ils voient exclusivement les mains et avant-bras du partenaire. Leur comportement est filmé en continu. Et les données comportementales seront obtenues à partir de l'analyse de ces vidéos.

#### 2.1.2. Système dual-EEG

Le système d'amplification EEG utilisé était du type BrainAmp de la société Brain Product. Il comportait 64 canaux sur lesquels étaient connectés deux casques composés de 32 électrodes posées sur chacun des sujets. Ainsi, une même horloge est utilisée pour l'échantillonnage des signaux des deux casques ce qui

garantit une totale synchronisation des signaux EEG. De plus, chaque casque disposait de ses propres électrodes de référence et de terre. La masse en revanche était commune aux deux casques.

Les impédances de toutes les électrodes ont été contrôlées en début et milieu d'expérience afin de garantir un enregistrement optimal. Elles sont considérées comme valides si elles sont inférieures à 10 kOhm.

La fréquence d'échantillonnage est de 500Hz.

### **2.1.3. Synchronisation des mesures**

Nous avons donc adapté ce dispositif d'enregistrement dual-EEG au système de salles double vidéo du Centre Emotion. Ceci a nécessité de valider la compatibilité électromagnétique avec les appareils de l'environnement et d'adapter les connexions du dispositif EEG à l'éloignement des sujets. De plus, la contrainte expérimentale impose une synchronisation entre les enregistrements vidéo et EEG afin de mettre en relation les données comportementales et électrophysiologiques. Celle-ci est réalisée au moyen d'un signal lumineux produit par une diode électroluminescente placée à côté de l'objectif des caméras. L'impulsion qui lui est envoyée est également récupérée sur une piste technique de l'enregistrement EEG. De plus, afin de synchroniser le « Replay », une diode photovoltaïque est placée sur chaque moniteur pour détecter l'allumage des diodes dans les vidéos enregistrées antérieurement.

Ces ajustements techniques ont été réalisés par Laurent Hugueville et Pierre Canet, respectivement ingénieurs au LENA et au Centre Emotion.

## **2.2. Participants**

Six couples de sujets naïfs (2 couples de femmes - 4 couples d'hommes) ont donné leur consentement afin de participer à l'expérience. Les âges des couples conservés pour l'étude sont compris entre 22 et 27 ans, la moyenne étant de 24 ans. Les sujets sont sains (sans antécédents neurologiques ou psychiatriques), ont une vision normale ou corrigée à la normale, et sont de langue maternelle française. Quatre des couples sont formés de droitiers, l'un d'entre eux de gauchers et un dernier mixte. Le couple formé de deux gauchers a été écarté de l'analyse.

Chaque personne a reçu une indemnité de 50€ pour leur participation.

## **2.3. Protocole expérimental**

### **2.3.1. Conditions**

L'expérience menée contient plusieurs conditions possédant différents niveaux d'interaction entre les sujets afin de pouvoir créer des contrastes spécifiques lors de l'analyse ultérieure. Les conditions ont été appelées : « Bibliothèque de mouvements », « Imitation spontanée », « Imitation induite » et « Replay ». Les sujets sont assis en face d'un écran de télévision et ont pour consigne de le fixer pendant toute la durée des conditions.

La « bibliothèque de mouvements » consiste en l'observation conjointe du mouvement des mains d'une tierce personne. Cette vidéo a été enregistrée du même point de vue que celui imposé aux sujets dans les autres conditions. Elle permet aux sujets de se familiariser l'un à l'autre. Les gestes symboliques et conventionnels étant proscrits, cette vidéo a également pour vocation de les inspirer pour les types de gestes qu'ils pourront exécuter dans les autres conditions. La consigne donnée est : « Regardez la vidéo sans bouger. »

La condition d' « imitation spontanée » consiste en un mouvement des mains avec imitation à volonté des mouvements des mains de l'autre. La consigne donnée est : « Imitiez quand vous le souhaitez. »

La condition d' « imitation induite » quant à elle impose une imitation dans un sens défini. Les mouvements du sujet imitant sont différés de ceux des mains de l'autre. Les consignes données sont :

- pour le sujet dit « meneur » : « Exécutez des mouvements des mains. »
- pour le sujet dit « mené » : « Imiter les gestes de l'autre. »

Enfin, la condition dite de « Replay » consiste en l'observation d'un enregistrement vidéo d'une condition d'imitation spontanée antérieure. En revanche, les sujets sont naïfs et ignorent que la vidéo n'est pas en direct. Ils reçoivent les mêmes instructions que pour la condition d'imitation spontanée : « Imiter quand vous le souhaitez. ».

Deux situations contrôles (encore appelée ligne de base) précèdent les conditions afin d'évaluer les variabilités entre sujets, d'optimiser les méthodes et le nombre de paramètres à explorer. Elles s'exécutent toutes les deux en fixant du regard l'écran de télévision éteint.

La première situation contrôle consiste à ne rien faire : on l'appellera BL1 ou ligne de base 1

La deuxième consiste en l'exécution du même type de gestes que lors du reste de l'expérience mais toujours en l'absence de vidéo : on l'appellera BL2 ou ligne de base 2.

Dans un premier temps, les sujets suivent la situation contrôle n°1 pendant 15 secondes, puis enchaînent directement sur la deuxième pendant 15 secondes. Seule la condition « Bibliothèque de mouvements » n'est pas précédée de la deuxième condition contrôle puisque les sujets ne bougent pas pendant cette condition.

### 2.3.2. Déroulement

Le déroulement global de l'expérience se fait en 2 blocs de 5 conditions :

- Bibliothèque de mouvements
- Imitation spontanée
- Imitation induite dans un premier sens
- Imitation induite dans le deuxième sens
- Replay

Les conditions sont toutes d'une durée d'une minute et trente secondes.

Les sens des imitations induites sont inversés pour le bloc 2 par rapport au bloc 1. Le sujet n°1 est choisi comme premier meneur pour toutes les expériences.

Condition	Durée	
Bibliothèque de mouvements	0:15 + 1:30	<b>Bloc 1</b>
Imitation spontanée	0:30 + 1:30	
Imitation induite S1 imite S2	0:30 + 1:31	
Imitation induite S2 imite S1	0:30 + 1:32	
Replay	0:30 + 1:33	
<b>Pause</b>	10:00	
Bibliothèque de mouvements	0:15 + 1:30	<b>Bloc 2</b>
Imitation spontanée	0:30 + 1:30	
Imitation induite S1 imite S2	0:30 + 1:31	
Imitation induite S2 imite S1	0:30 + 1:32	
Replay	0:30 + 1:33	
Imitation spontanée	0:30 + 1:30	
<b>Expérience totale</b>	<b>31:30</b>	

**Tableau 1: Récapitulatif du déroulement de l'expérience.**

La durée d'1 minute 30 a été déterminé par des expériences pilotes en fonctions des contraintes de l'analyse EEG. Une condition d'imitation spontanée a également été rajoutée en fin de second bloc pour des les nécessité de l'analyse électrophysiologique. Nous y reviendrons après avoir présenter l'analyse comportementale.

L'expérience en tenant compte de la pose des deux casques EEG dure environ 2 heures.

## 2.4. Traitement de données

Le schéma global du traitement de données est présenté dans la figure n°4. Il implique d'une part une analyse comportementale à partir des vidéos et une analyse des signaux EEG d'autre part, guidée par l'analyse comportementale. Nous allons donc maintenant expliciter ces deux types de traitement.

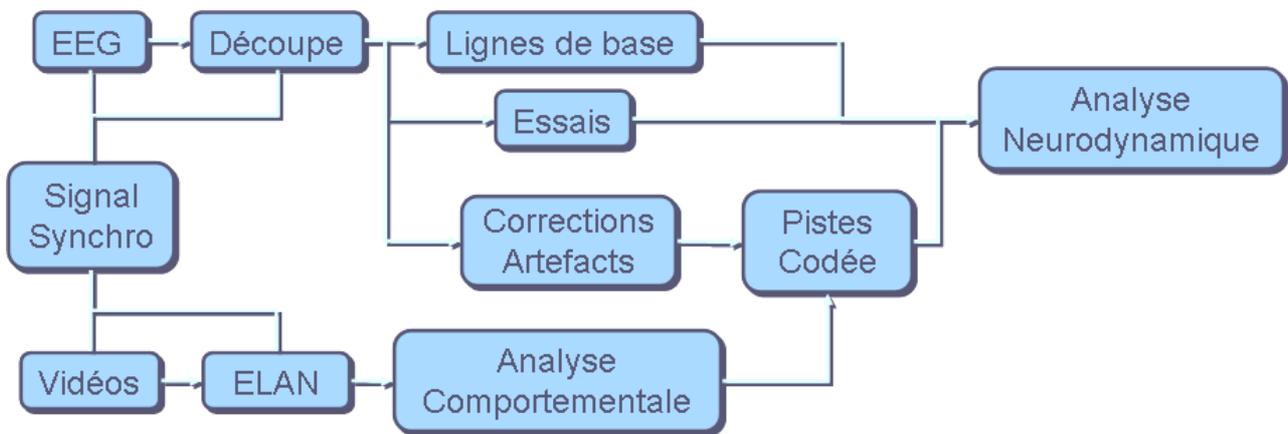


Figure 4: Schéma synthétique de l'analyse des données.

### 2.4.1. Traitements comportementaux

Ce traitement vise à segmenter chaque condition expérimentale en un certain nombre de comportements liés à l'imitation à partir de l'analyse vidéo. L'encodage simultané des vidéos synchronisées a été réalisé au moyen du logiciel ELAN développé au Centre Emotion par Ouriel Grynszpan (2006). Il permet l'indexation multiple au moyen de plusieurs pistes de codage. De plus, ce logiciel offre la possibilité d'analyser les vidéos image par image. On parle ici de codage dans le flux.



Figure 5: Exemple de codage à l'aide du logiciel ELAN.

Le traitement des données vidéo implique l'accord sur des critères comportementaux robustes. Il a été choisi de coder séparément deux comportements caractéristiques : la synchronie (S) et l'imitation (I). Nous avons donc établi avec Robert Soussignan et Jacqueline Nadel des critères robustes afin de repérer ces comportements sur les vidéos. De plus, il a été décidé de coder le sens de l'imitation en indiquant le sujet qui mène en complément, afin de pouvoir mettre en évidence le phénomène de turn-taking ultérieurement.

Ainsi pour chaque image, ces trois paramètres sont déterminés : la synchronie, l'imitation et le meneur de l'interaction dans les phases d'imitation. Ceci donne lieu à 4 situations composées résumées ci-dessous.

	<b>Imitation (I)</b>	<b>Non-Imitation</b>
<b>Synchronie (S)</b>	Imitation synchronie (SI)	Synchronie
<b>Non-Synchronie</b>	Imitation	Non-Interaction

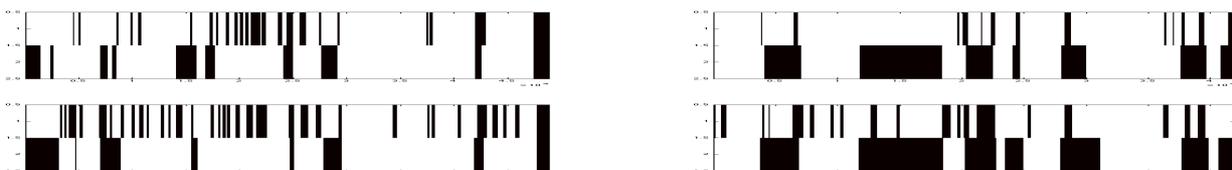
**Tableau 2: Récapitulatif des types de comportements définis à partir de l'imitation et de la synchronie.**

La synchronie et l'imitation sont deux paramètres bien différents lors d'une interaction inter-subjective. La synchronie est une mesure temporelle. Il est convenu dans le cadre de l'étude que les sujets sont considérés comme en synchronie lorsqu'ils bougent en même temps à l'image près. L'imitation quant à elle est une mesure morphologique relative aux gestes exécutés par l'un et l'autre des sujets. Il y a imitation lorsqu'un schéma gestuel de l'un des sujets est reproduit par l'autre ultérieurement. Le schéma gestuel est dit identique s'il se place dans le même plan dans l'espace, utilise la même direction et que les doigts sont dans la même position. En revanche, on parle de "non imitation" lorsqu'un sujet exécute un mouvement n'ayant pas été réalisé par l'autre auparavant. Ainsi il faut prendre en compte le retard de phase pour décider s'il y a ou non imitation. Le sujet est dit « meneur » s'il est l'instigateur du schéma gestuel considéré à chaque instant des phases d'imitation.

Sur la base des deux éléments, imitation et synchronie, on peut définir l'intersection de ces deux comportements qui est l'imitation synchronie (SI) et qui correspond au cas idéal de boucle perception-action.

Pour l'accord inter-observateur, deux observateurs, Robert Soussignan et moi-même, ont codé les conditions d'imitation spontanée du premier couple de sujet.

Le pourcentage d'accord se base sur les occurrences codées qui se définissent par le début et la fin d'un comportement S ou I. Deux codages ont ainsi été réalisés sur le premier couple afin de vérifier la robustesse des critères. Sur deux essais d'imitation spontanée, représentant plus de 100 occurrences chacun, ce pourcentage d'accord est de 82% pour le paramètre d'imitation et 92.5% pour le paramètre de synchronie avec une précision de 400ms.



**Figure 6 : Pistes de codage des imitations spontanées du premier couple : S en premier, I en second, la présence du comportement est indiquée par du blanc. Chaque colonne représente l'un des échanges, chaque ligne correspond à un observateur.**

Plusieurs mesures sont ensuite déduites du codage effectué sur les vidéos. Les premières sont les durées relatives de chaque situation exprimées en pourcentage de la durée totale de l'essai.

A partir de l'analyse du sens de l'imitation nous avons également déterminé un indice de symétrie de l'interaction imitative. Cet indicateur représentant la répartition du temps d'imitation entre les sujets. Il est calculé en fonction des périodes de « drive » durant lesquels un sujet est dit meneur :

$$I_{symetrie} = \frac{T_{drive1} - T_{drive2}}{T_{drive1} + T_{drive2}}$$

Ainsi il vaut +1 si le sujet 1 est imité pendant toute la durée de l'échange, -1 si c'est le sujet 2. Un rapport nul indique une répartition équilibrée de l'imitation.

Le turn-taking est une mesure comportementale empirique qui ne comporte aucun référentiel absolu, il a donc été choisi de normaliser sur tous les couples le nombre de passage de main en fonction du cas maximal et minimal observés à travers les expériences. Ainsi, l'indice de turn-taking s'exprime comme :

$$I_{tt} = \frac{X - Min}{Max - Min}$$

Ainsi un indice de 0 signifie que le turn-taking est le plus faible rencontré à travers les couples, et un indice de 1 signifie qu'il est le plus important. Ce paramètre, comme pour ceux calculés dans l'analyse électrophysiologique intègre les observations sur tous les couples.

## 2.4.2. Traitements signaux électrophysiologiques

### 2.4.2.1. Prétraitement

Le traitement des signaux EEG débute par le retrait des électrodes ayant eu une impédance trop élevée. Ces électrodes sont retirées de l'analyse sur les deux casques afin de conserver une symétrie du dispositif. Dans cette étude, les électrodes T7 (12), T8 (16), TP9 (17) et TP10 (22) ont été exclues.

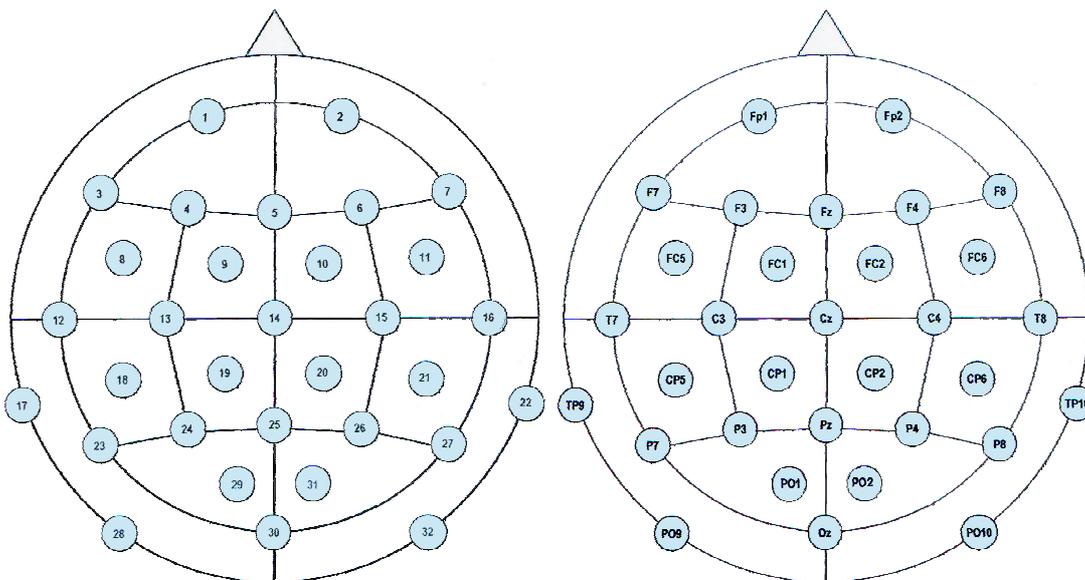


Figure 6 : Schémas de montage EEG: numéro d'électrode (à gauche), label aux normes ERPA (à droite).

Un algorithme de correction d'artefacts (Wallstrom, Kass et al. 2004) est ensuite appliqué aux données afin d'éliminer la contribution des signaux oculomoteur et cardiaques dans les enregistrements. Soit  $M_b$  la matrice des mesures EEG 'brutes' issues d'une fenêtre d'analyse, on réalise une décomposition en valeur singulière de la matrice étendue  $\begin{pmatrix} M_b \\ EOG \end{pmatrix}$  où l'on rajoute une ligne contenant le signal oculomoteur. La décomposition obtenue prend la forme  $UDV^T$  où U et V regroupent les vecteurs colonnes orthonormés spatiaux et temporels respectivement et D est la matrice diagonale des valeurs singulières. Les coefficients de corrélation de chaque vecteur temporel de V avec le signal EOG est évalué par  $\frac{V^T EOG^T}{\|EOG\|}$ . Les valeurs

singulières correspondant à des vecteurs temporels  $V$  qui présentent un coefficient de corrélation supérieur à 0.9 sont alors annulées dans la matrice  $D$  pour former la nouvelle matrice  $\tilde{D}$  (les autres valeurs singulières sont conservées). Celle ci permet de reconstituer le signal corrigé  $U\tilde{D}V^T$ .

Un filtrage de type peigne est appliqué à 50Hz et un filtrage passe bas à 100Hz est appliqué afin de supprimer les perturbations à 50Hz et à ses harmoniques liées au secteur.

Pour toutes les conditions, un repérage manuel des zones artefactées restantes a été effectué. Ces zones sont exclues des calculs ultérieurs.

Intervient ensuite une segmentation des signaux EEG: une première afin de séparer les différentes situations contrôle à partir des pistes techniques dont sont extraits les signaux de synchronisation évoqués auparavant, une seconde est réalisée en fonction des indices comportementaux S, I et SI.

### 2.4.2.2. Calcul des puissances spectrales

Chaque segment est décomposé en fenêtre de 2 secondes sur lesquels on calcule les puissances spectrales au moyen d'une transformée de Hilbert dans les différentes bandes de fréquences données au tableau 3. Concernant les contraintes liées à l'analyse neurodynamique et spécifiquement à la discrimination de classes de tâches, il y a nécessité d'avoir au minimum une cinquantaine de segments par classe. Dans le cas de l'imitation spontanée, il a été déterminé d'après des expériences pilotes qu'en 1 minute et 30 secondes, dans le pire des cas il y a 30 secondes de d'imitation synchrone (SI). Il a également été déterminé que la plus petite durée d'une phase d'interaction était de l'ordre de 800 millisecondes. En 3 essais d'imitation spontanée le quota semble donc atteignable.

Afin de comparer les différentes situations comportementales, nous calculons une valeur de T sur les puissances spectrales entre les conditions, pour tous les sujets et à travers toutes les occurrences :

$$T_{1-2} = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \text{ avec } \bar{X}_i \text{ la moyenne sur la population } i, \text{ et } s_i \text{ son écart type.}$$

Cette valeur est calculé pour chaque bande de fréquence et chaque électrode.

Afin de corriger ce test en tenant compte des corrections multiples, nous avons utilisé une méthode de permutation (Nichols and Holmes 2002; Pantazis, Nichols et al. 2003; Pantazis, Nichols et al. 2005). On applique cette méthode de test comparatif aux deux conditions par permutations. La significativité est calculée en fonction de l'erreur de rejection minimale. Ainsi au lieu d'utiliser une comparaison multiple de type Bonferroni, le taux de fausse erreur est calculé à partir de plusieurs tests de Student effectués sur des permutations aléatoires entre les échantillons des deux conditions testées

Cette statistique donne un seuil de valeur de T pour une électrode à une fréquence donnée correspondant à la probabilité d'être au-dessus du seuil en tenant compte des électrodes à toutes les bandes de fréquences.

Ces tests statistiques sont effectués soit pour l'ensemble des électrodes pour une bande de fréquences donnée, soit pour un groupement anatomique d'électrodes à toutes les fréquences (Voir tableau 3 à la page suivante). L'objectif est de localiser soit spatialement soit fréquemment, un effet de la synchronie communicative.

Ces méthodes avaient été développées par Jacques Martinerie et je les ai adapté au cas intersujet de notre situation expérimentale (S, I et SI). L'adaptation des différents formats de fichiers et le pont entre le logiciel ELAN et les différents programmes de traitements Matlab ont entièrement été réalisé par mes soins.

Lobes	Électrodes
Frontal	FP1, FP2, F7, F3, Fz, F4, F8, FC5 & FC6
Occipital	Pz, PO9, PO1, PO2, PO10 & Oz
Pariétal gauche	P7, CP5, P3
Pariétal droit	P8, CP6, P4
Central	FC1, FC2, Cz, CP1, CP2

Bande de fréquences	Bornes
Delta	1-4Hz
Theta	4-7Hz
Alpha	8-12Hz
Mu	10-12Hz
Beta 1	13-21Hz
Beta 2	22-30Hz
Gamma 1	31-45Hz
Gamma 2	55-70Hz

**Tableau 3: Correspondance des zones anatomiques et des électrodes (à gauche) - Bandes de fréquences avec leurs bornes (à droite).**

### 2.4.2.3. Analyse des synchronies de phase

La méthode PLS (Phase Lock Statistic) de calcul des synchronies de phase a été ensuite appliquée (Lachaux, Rodriguez et al. 1999) pour estimer la synchronisation entre les électrodes des deux casques. La technique consiste en l'intégration de la différence de phase entre deux signaux :

Soit S1 et S2, deux signaux EEG, ils sont représentés dans l'espace de Hilbert sous cette forme :

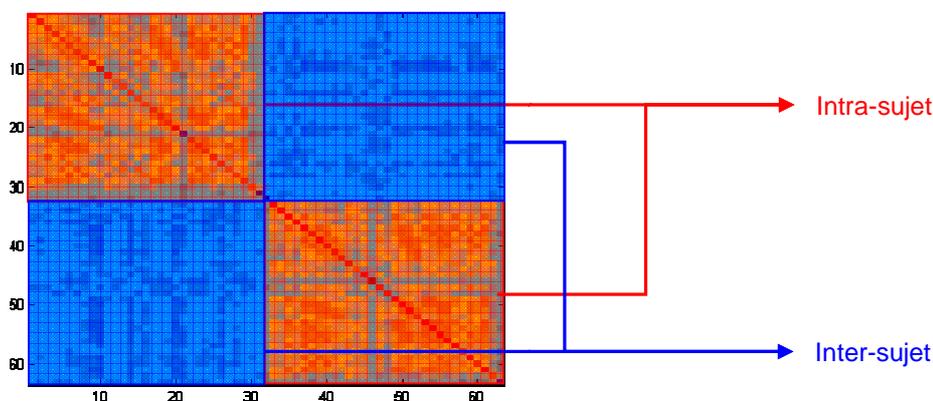
$$S_1(t) = \sum_n c(t,n)e^{i\varphi_1(t,n)} \text{ et } S_2(t) = \sum_n c(t,n)e^{i\varphi_2(t,n)}$$

La synchronie de phase est alors déterminée par :

$$PLV(t) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=1}^N \exp(j\theta(t,n)) \right|$$

où N est le nombre d'échantillons de la fenêtre d'intégration et  $\theta(t,n) = \varphi_1(t,n) - \varphi_2(t,n)$

A la différence des études précédentes, les matrices de synchronies obtenues comprennent les synchronisations intra et inter-sujets.



**Figure 7: Exemple de matrice de synchronie en dual-EEG. Les blocs diagonaux représentent les synchronies intra-sujet, les blocs anti-diagonaux les synchronies inter-sujets**

La fenêtre d'intégration est de 800 millisecondes et le pas d'incrémentation de 400 millisecondes. Afin de déterminer les synchronies significatives, un test par permutation est réalisé avec 100 permutations. Le seuillage des matrices est fait par le maximum des valeurs obtenues par permutation afin d'obtenir les synchronies significatives. Les matrices seuillées donnent ainsi une matrice d'adjacence du graphe de connectivités neuronales pondérées par la puissance de chaque synchronie.

Ces connectivités correspondent aux liens fonctionnels mesurés entre les populations neurales. Un nombre élevé de connectivité signifie une synchronisation des populations. Cette indice fonctionnel bien qu'ayant une dépendance de la puissance spectrale est différent. Il est relatif à une mise en relation de zone fonctionnelle et indique un traitement cognitif distribué.

Dans notre étude, nous dissociions la connectivité intra et inter-sujet (Voir figure 7). La connectivité intra-sujet correspond aux synchronies de phases ayant lieu au sein d'un individu alors que la connectivité inter-sujet fait référence à une synchronisation entre les deux cerveaux.

Le même type de test statistique utilisé pour les transformées temps-fréquences est appliqué ensuite aux matrices de synchronies.

## 3. Résultats comportementaux

### 3.1. Répartition des différents types d'interaction

La figure 8 présente pour tous les couples l'évolution des différentes mesures d'interaction. On remarque que le couple n°6 présente un profil différent. Les autres couples, quant à eux sont homogènes dans leurs paramètres d'interaction.

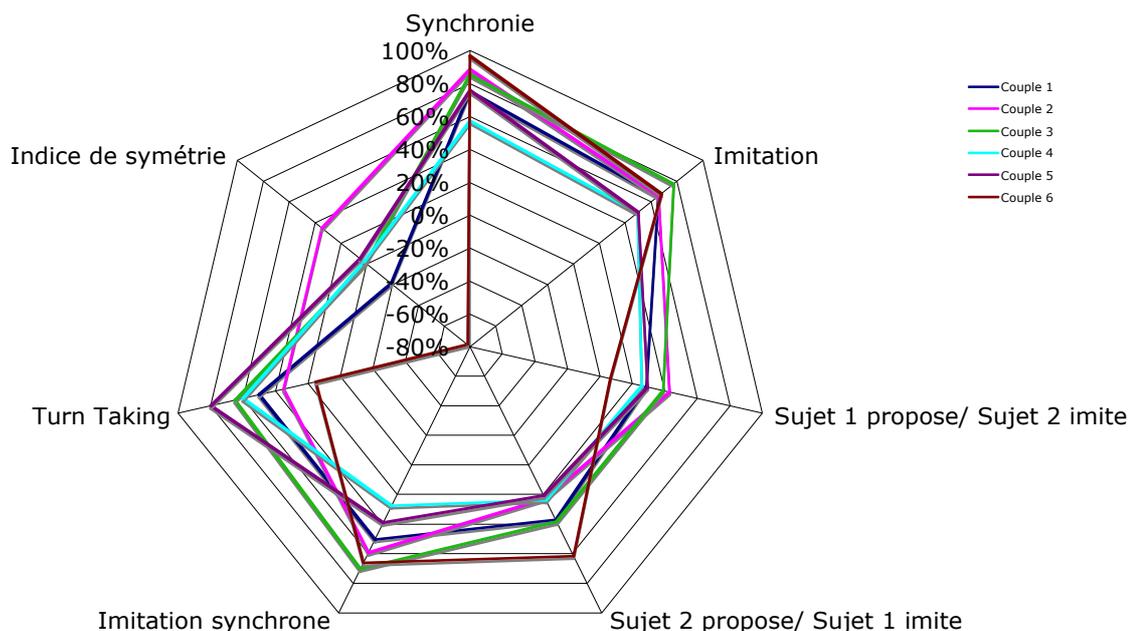


Figure 8: Récapitulatif pour toutes les dyades, des différentes mesures d'interaction.

### 3.2. Turn-taking

La figure 9 représente la dynamique du turn-taking suivant les couples. On constate que le couple 6 présente une très forte asymétrie des rôles de modèle et d'imitateur. Il ne peut donc pas être pris en compte pour l'analyse électrophysiologique et est exclu de l'analyse.

On remarque également une dynamique qui se répète à travers les couples et qui est en cohérence avec les résultats de modélisations du turn-taking réalisés par l'équipe d'Ikegami (Ikegami and Iizuka 2007) : les périodes d'imitation qui précèdent un changement de sens dans l'imitation sont toujours des imitations synchrones suivies d'une brève rupture d'interaction.

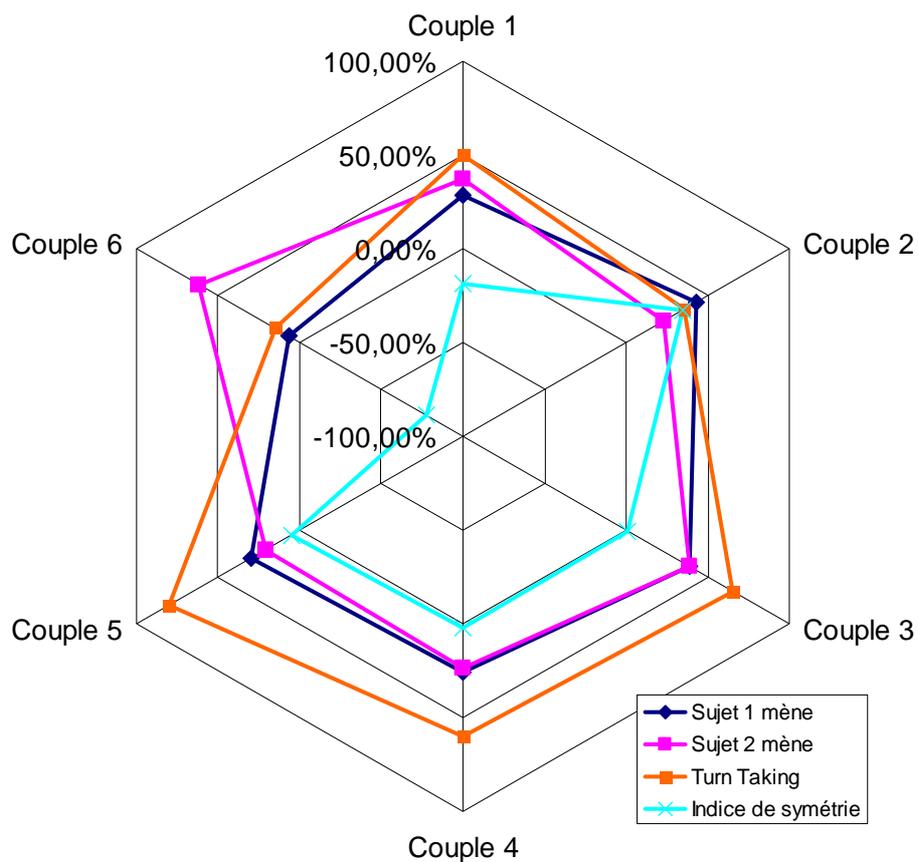


Figure 9: Evolution sur les 6 couples des paramètres liés à la prise de parole dans l'imitation.

La figure 10 présente les durées relatives des différentes situations comportementales sur l'ensemble des couples retenus pour l'analyse électrophysiologique.

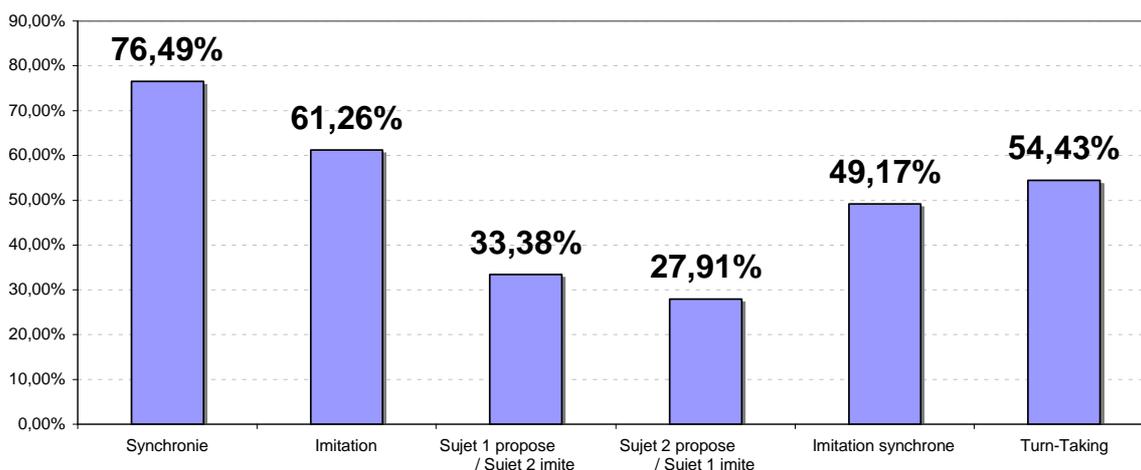


Figure 10: Répartition des durées relatives des différents types de comportements au cours de la condition d'imitation spontanée (% du temps total) pour les 5 couples retenus.

Il apparaît que la synchronie et l'imitation couvrent une part majeure de la durée totale des conditions d'imitations spontanées. Il est à rappeler que les sujets sont libres d'imiter ou non dans cette condition. Cependant, ils préfèrent l'interaction et les périodes de non-imitation et non-synchronie sont rares. Les sujets ont même rapporté après l'expérience avoir eu un plaisir à interagir.

Le passage de main ou « turn-taking » est également dans l'ensemble similaire sur tous les couples avec une moyenne de 5 passages de main par essai.

Enfin, il est confirmé par l'analyse comportementale que les différentes phases d'interactions (S, I et SI) dans l'imitation spontanée sont de l'ordre de 800ms au minimum ce qui est cohérent avec nos hypothèses. Le nombre d'occurrences est donc suffisant pour l'analyse électrophysiologique.

# 4. Résultats électrophysiologiques

## 4.1. Etude temps-fréquence

Les résultats des tests de Student permutés sont donnés dans la suite sous deux formes : fréquentielle ou topologique. Les figures fréquentielles sont relatives à un groupe d'électrode. Ils présentent la variation statistique de la puissance pour toutes les fréquences. Les seuils de significativité sont donnés systématiquement. Les deux derniers correspondent à  $p=0.005$  et  $p=0.001$  sont tracés respectivement en jaune et en vert sur les figures. Les figures topologiques quant à elle sont relatives à une bande de fréquence donnée mais représentent la variation de puissance sur tout le scalp. Les seuils de significativité sont également donnés systématiquement.

### 4.1.1. Situation contrôle n°2 (BL2) VS situation contrôle n°1 (BL1)

La situation contrôle n°1 est l'état de repos, la n°2 consistant à bouger uniquement les mains sans que l'écran soit allumé, le contraste met en évidence les corrélats de l'activité motrice. Il est important de noter que ce contraste a été calculé sur l'ensemble des conditions (imitation induite, imitation spontanée et replay).

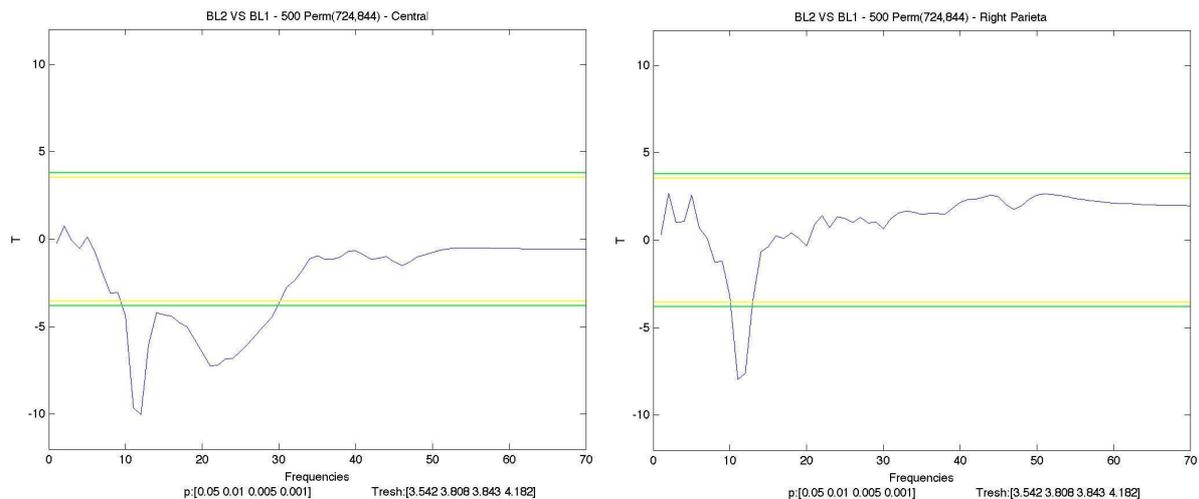
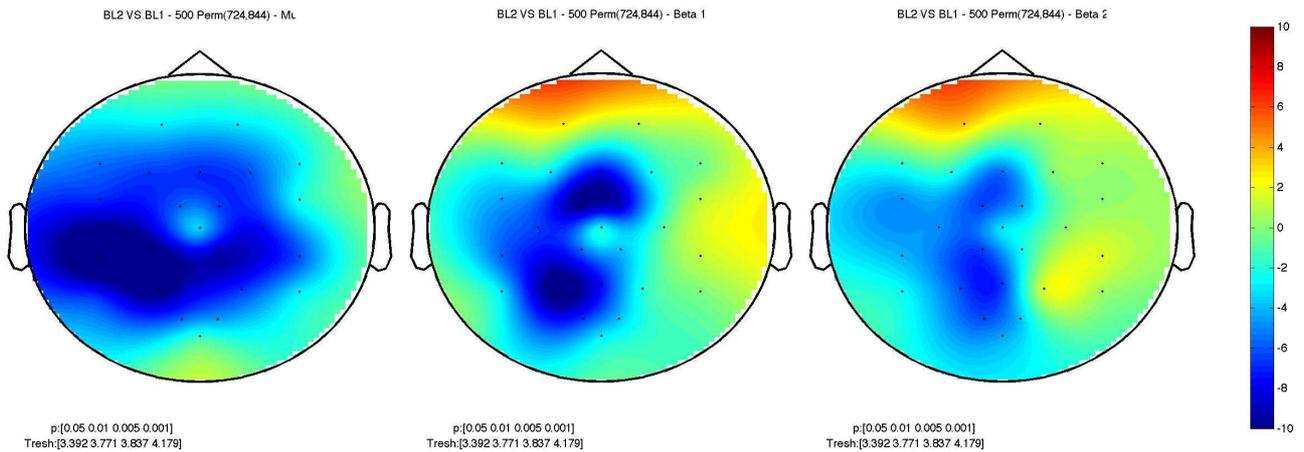


Figure 11: Situation contrôle n°2 VS situation contrôle n°1 au niveau du lobe Central (à gauche) et du Pariétal droit (à droite). Les seuils de significativité sont donnés pour chaque valeur de p et tracés.

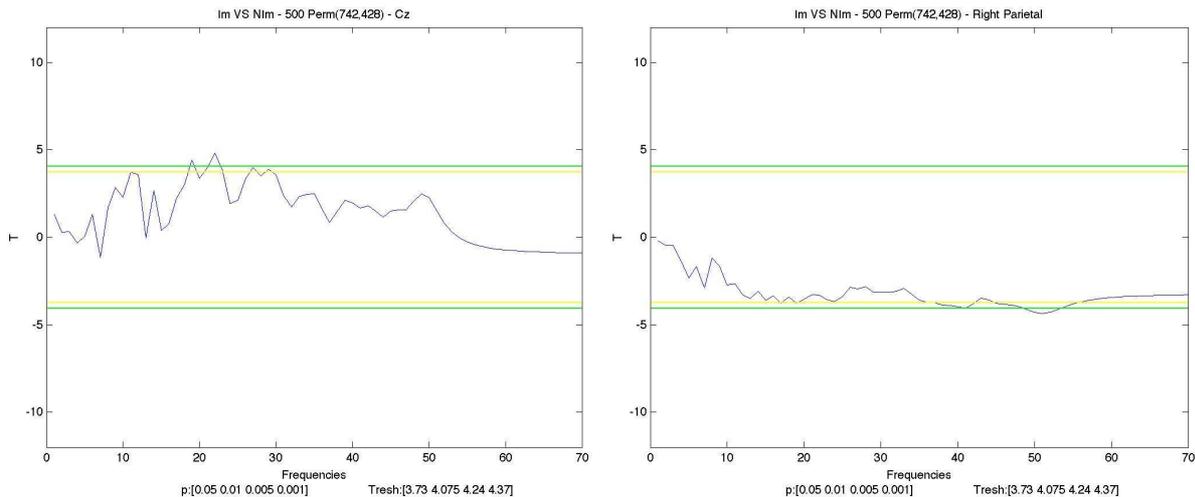


**Figure 12: Situation contrôle n°2 VS situation contrôle n°1 dans la bande fréquence du Mu (à gauche), du Beta 1 (au centre) et du Beta 2 (à droite). Les seuils de significativité sont donnés pour chaque valeur de p.**

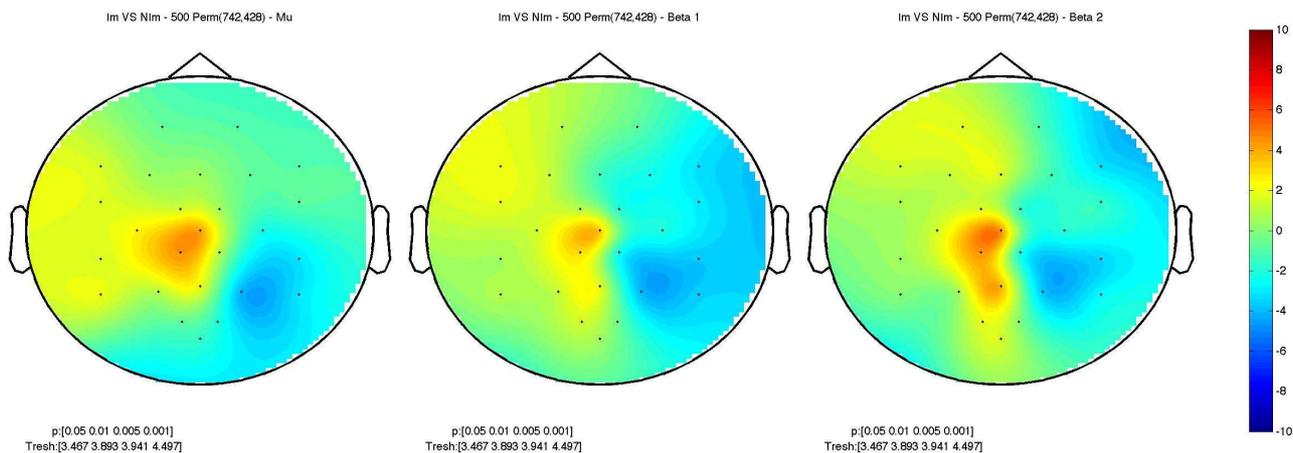
Ce contraste a une valeur de contrôle pour notre chaîne de traitement. Le contraste est d'ailleurs plus marqué du fait du nombre d'occurrences sur l'ensemble de l'expérience. La littérature est déjà remplie de résultats à propos de l'abaissement autour du cortex sensorimoteur des rythmes Mu et Beta lors de la réalisation de mouvements par rapport à l'état d'immobilité (Brovelli, Battaglini et al. 2002; Miller, Leuthardt et al. 2007). Nous retrouvons un abaissement significatif du rythme Mu au niveau de l'aire sensorimotrice primaire. On remarque une latéralisation gauche pour le Mu ce qui est là aussi en accord avec la contra latéralité de la dominance manuelle puisque la majorité de nos sujets étaient droitiers. L'abaissement de Beta se situe plus au niveau de l'aire prémotrice et motrice supplémentaire ainsi qu'au niveau de l'aire associative pariétale postérieure.

#### 4.1.2. Imitation VS Non-imitation

Ce contraste compare non pas deux conditions mais deux situations comportementales indexées sur les essais d'imitation spontanée. La comparaison entre période d'imitation et période de non-imitation nous donne une première approche des corrélats neuronaux de l'imitation.



**Figure 13: Condition Spontanée - Imitation VS Non-Imitation au niveau de Cz (à gauche) et du Pariétal droit (à droite). Les seuils de significativité sont donnés pour chaque valeur de p et tracés.**

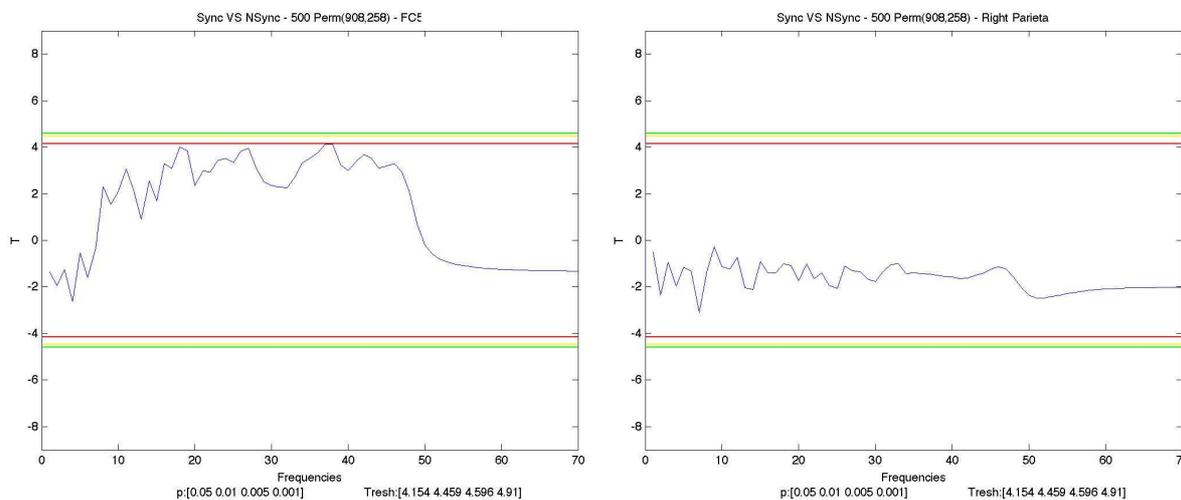


**Figure 14: Condition Spontanée - Imitation VS Non-Imitation dans la bande fréquence du Mu (à gauche), du Beta 1 (au centre) et du Beta 2 (à droite). Les seuils de significativité sont donnés pour chaque valeur de p.**

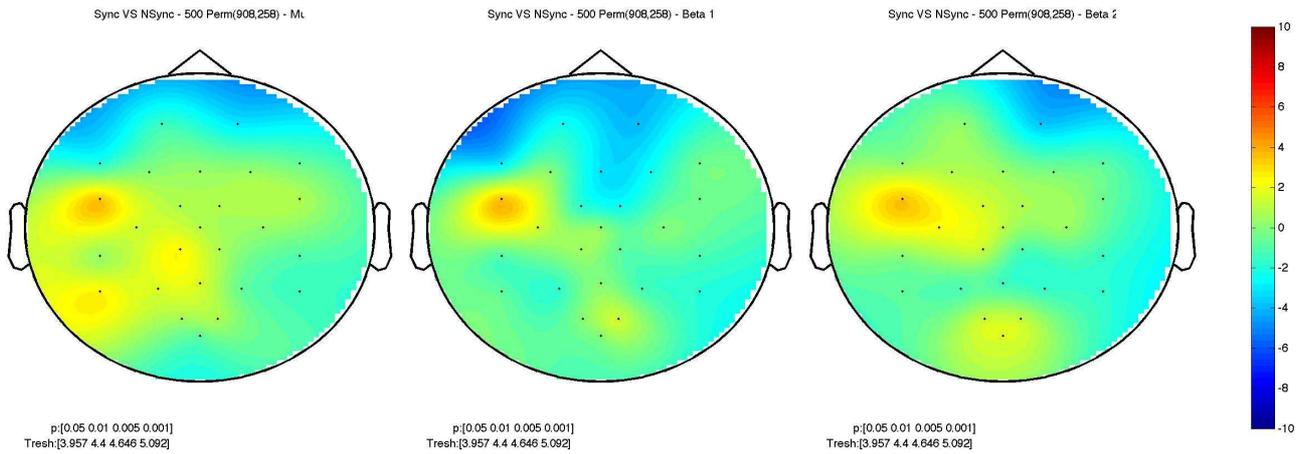
Il y a une activation au niveau de Cz ainsi qu'une désactivation au niveau du pariétal droit. L'effet le plus marqué est dans la gamme de fréquences du Béta 2 mais il est présent dans l'Alpha jusque dans le Gamma 1.

### 4.1.3. Synchronie VS Non-Synchronie

Ce contraste, tout comme le précédent, est relatif à des comportements observés lors des essais d'imitation spontanée. Il correspond à notre second paramètre d'interaction qui est la synchronie.



**Figure 15: Condition Spontanée - Synchronie VS Non-Synchronie au niveau de FC5 (à gauche) et du lobe pariétal droit (à droite). Les seuils de significativité sont donnés pour chaque valeur de p et tracés.**

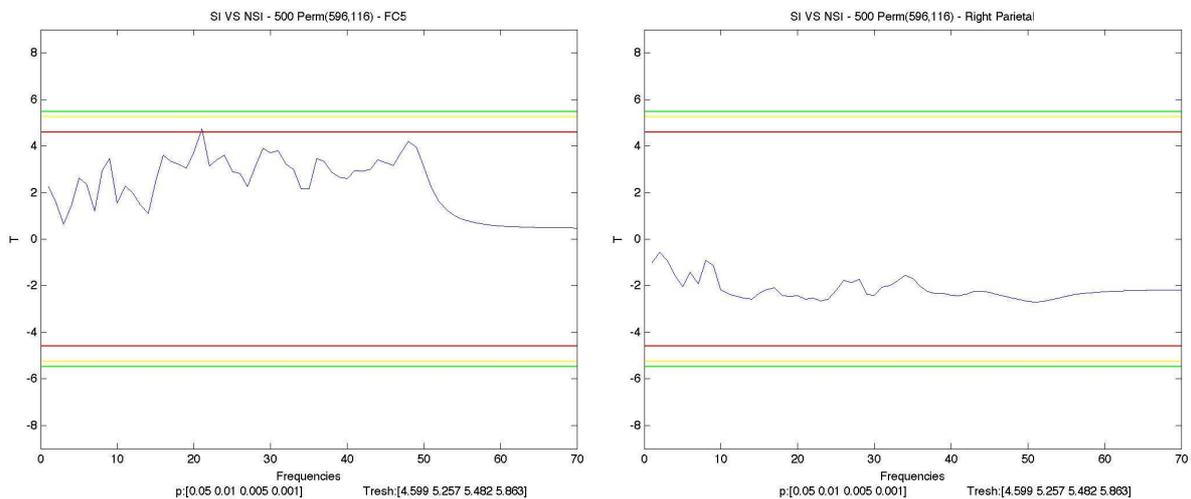


**Figure 16: Condition Spontanée - Synchronie VS Non-Synchronie dans la bande fréquence du Mu (à gauche), du Beta 1 (au centre) et du Beta 2 (à droite). Les seuils de significativité sont donnés pour chaque valeur de p.**

L'ensemble du scalp semble inchangé excepté au niveau de l'électrode FC5 où il y a une activation plus importante ( $T=+3$ ) lors de la synchronie dans l'Alpha, le Beta et les bas Gamma.

#### 4.1.4. Imitation synchrone VS Non-synchronie et non-imitation

La comparaison de l'imitation synchrone avec la non-synchronie et la non-imitation nous donne le contraste le plus élevé d'un point de vue comportemental. Il correspond à l'état quasi-parfait de boucle perception-action comparé à la non interaction.



**Figure 17: Condition Spontanée - Imitation synchrone VS Non-synchronie et non-imitation au niveau de FC5 (à gauche) et du lobe pariétal droit (à droite). Les seuils de significativité sont donnés pour chaque valeur de p et tracés.**

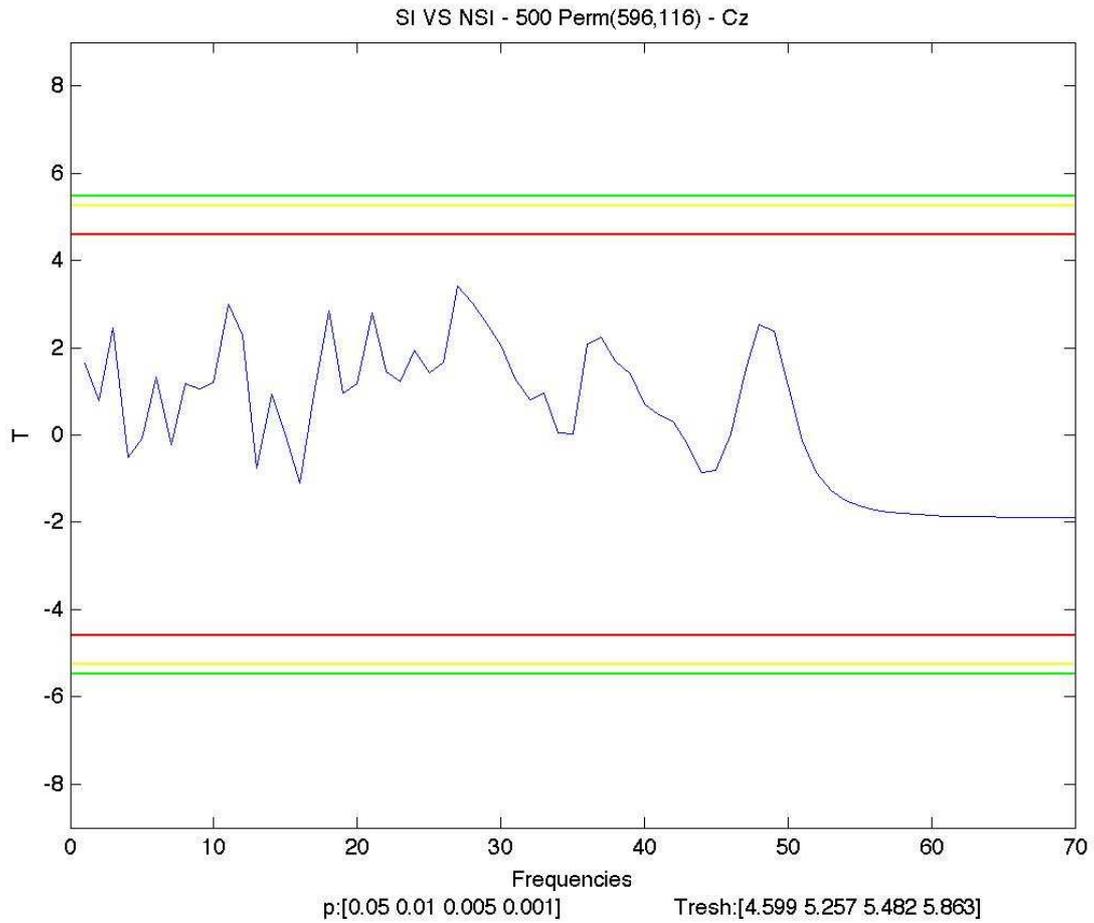


Figure 18: Condition Spontanée - Imitation synchrone VS Non-synchronie et non-imitation au niveau de Cz. Les seuils de significativité sont donnés pour chaque valeur de p et tracés.

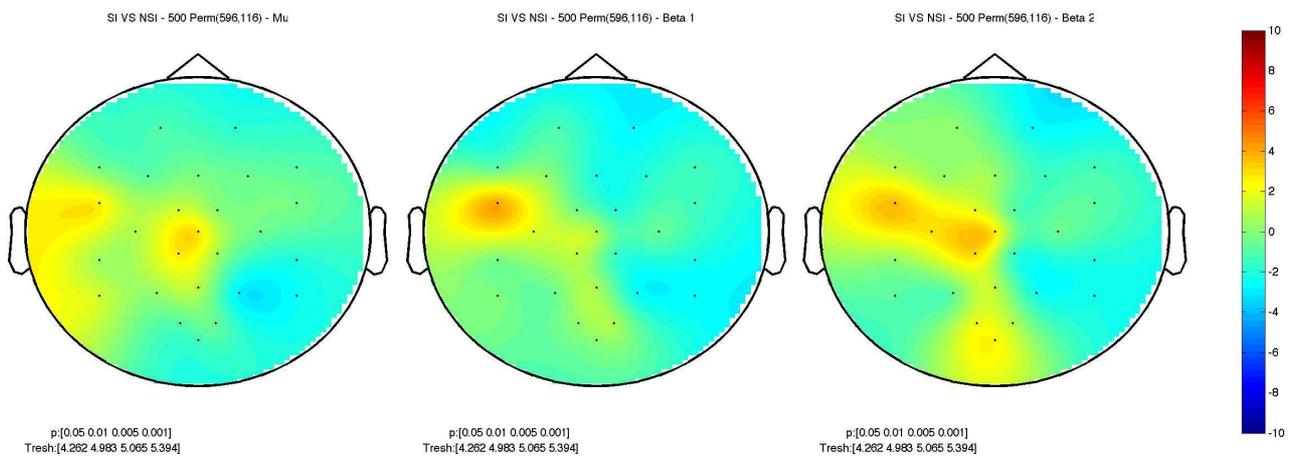
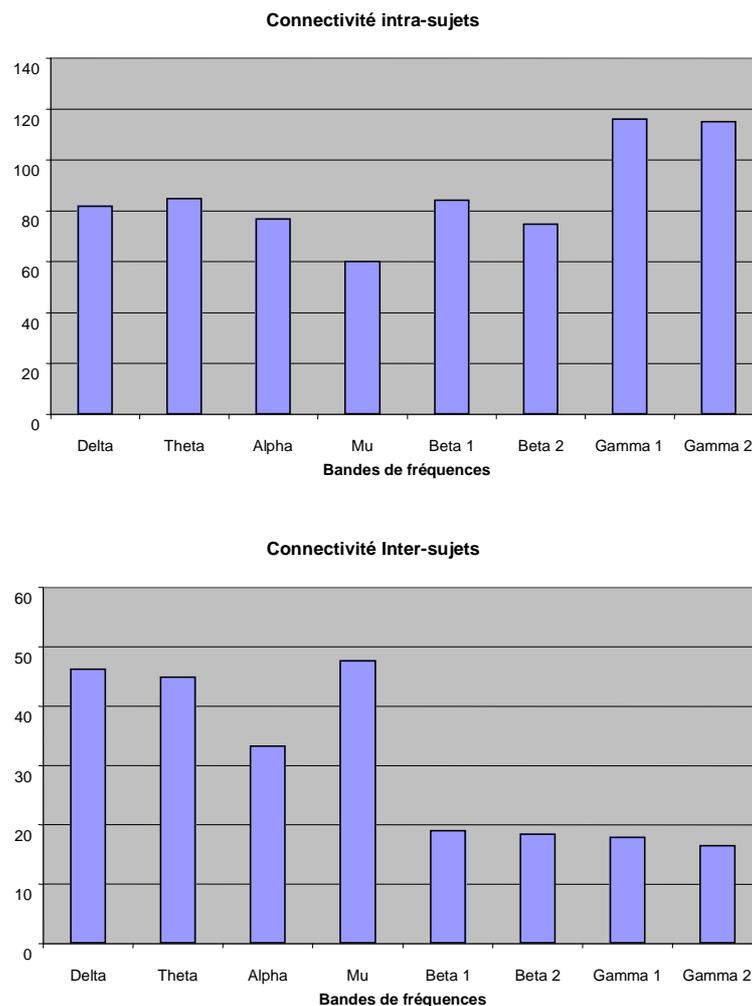


Figure 19: Condition Spontanée – Synchronie & Imitation VS Non-Synchronie & Non-Imitation dans la bandes de fréquences du Mu (à gauche), du Beta 1 (au centre) et du Beta 2 (à droite). Les seuils de significativité sont donnés pour chaque valeur de p.

Du fait de la rareté des occurrences non synchronies non imitation, ces figures montrent un effet à la limite de la significativité. L'effet principal est une activation du cortex sensori-moteur gauche, combiné à une désynchronisation du pariétal droit. Ici encore, il y a une continuité à travers les fréquences des zones désynchronisées. On remarque la superposition de l'effet noté dans le second et le troisième contraste.

## 4.2. Synchronies de phase

La figure 20 présente nos premiers résultats concernant les synchronies de phases. Les nombres de synchronies sont moyennés à travers les 10 sujets et sur l'ensemble des conditions d'imitation spontanée. Les synchronies sont calculées sur toute la durée de la condition, indépendamment de l'indexage comportemental pour le moment.



**Figure 20: Répartition moyenne pour une fenêtre de 800ms des synchronies significatives par bandes de fréquences en intra-sujet (au dessus) et en inter-sujet (en dessous).**

La première constatation est qu'il existe bien des synchronies inter-sujets significatives.

Au niveau de la répartition de ces synchronies de phase, celle-ci est différente dans le cas intra-sujet et le cas inter-sujet. Le maximum en intra-sujet est dans la bande Gamma alors que dans le cas inter-sujet, il se situe dans le Mu et de manière plus générale dans les fréquences basses.

# 5. Discussion

## 5.1. Discussion des résultats comportementaux

Nous avons trouvé que la plus grande partie des essais d'imitation spontanée se fait dans la synchronie et l'imitation. Il n'y a donc que très peu de non-interaction ce qui est cohérent avec nos hypothèses et nous a permis d'avoir un nombre suffisant d'échantillons pour procéder à l'analyse électrophysiologique.

L'homogénéité des paramètres comportementaux est remarquable compte tenu du fait que nous avons affaire à un système impliquant deux individus. Les variabilités inter-sujets qui à priori pouvaient conduire à une variabilité encore plus importante au niveau des dyades, a tendance à s'estomper. Ceci pourrait s'expliquer par la création lors de l'interaction d'un système dynamique plus stable et commun qui possède ses propres paramètres. Les études de Oullier (Oullier, de Guzman et al. 2007) et Issartel (Issartel, Marin et al. 2006) ont montré que de tels phénomènes sont présents au niveau des signatures motrices. Un phénomène de consensus est créé par l'interaction et conduit à une adoption par chacun des sujets en interaction de paramètres moteurs intermédiaires entre ceux personnels et ceux de l'autre. Notre étude montre qu'un tel consensus est également présent en ce qui concerne les paramètres de la synchronie communicative.

Le turn-taking est également assez équilibré à travers les couples. Il intervient avec une certaine régularité ce qui est lié à la répartition équilibrée du temps de parole lors de l'imitation. Ce turn-taking qui a pu être expliqué au niveau comportemental par l'effet de la synchronie communicative (Ikegami and Iizuka 2007) est clairement visible dans nos observations au niveau des dynamiques dyadiques: l'imitation après avoir été initiée devient une imitation synchrone puis se rompt brièvement pour laisser place à un autre sens de l'échange.

## 5.2. Discussion des résultats électrophysiologiques

Le système dual-EEG qui est relativement nouveau dans le domaine de l'imagerie cérébrale a nécessité des critères de validation. La chaîne de traitement notamment a été validée à partir du contraste entre les deux situations contrôles. L'abaissement du Mu et du Beta lié à l'activité motrice a bien été significativement observé et est en cohérence avec la littérature (Brovelli, Battaglini et al. 2002; Miller, Leuthardt et al. 2007).

Dans la suite de notre analyse, l'originalité des contrastes provient de la séparation dans l'imitation spontanée de deux comportements, la synchronie et l'imitation, et d'avoir étudié les corrélats cérébraux EEG relatifs à ceux-ci.

La seule étude qui a testé de tels corrélats de la synchronisation est celle de Tognoli (Tognoli, Lagarde et al. 2007) même si comme dit précédemment la tâche de tapping offrait un espace d'interaction assez restreint. Dans cette étude, il était mis en évidence un marqueur neuronal dans une bande de fréquence proche du Mu. Nous trouvons également des effets dans ces bandes de fréquences. Par contre dans leur cas, l'activité était localisée dans le pariétal droit alors que dans notre cas elle est dans le cortex prémoteur et moteur. Cette différence peut provenir de la grande différence de précision dans l'analyse comportementale. En effet, ce qui est appelé synchronie dans leur étude est dans notre paradigme une imitation-synchrone et donc cumule les deux phénomènes que nous observons. L'abaissement d'activité dans le pariétal droit serait donc cohérent dans ce cas, en revanche ils ne font aucune mention d'effet dans le cortex moteur primaire, l'aire prémotrice et motrice supplémentaire.

Nous retrouvons bien une implication des bandes de fréquences Mu dans le phénomène de synchronie comportementale. Par contre, nous trouvons également des activations dans des bandes de fréquences supérieures comme le Beta 1 et le Beta 2. Ces gammes de fréquences sont d'ailleurs relatives aux zones anatomiques non répertoriées dans l'étude de Tognoli.

En ce qui concerne l'isolement du phénomène de synchronisation, nous trouvons une augmentation de puissance dans certaines bandes de fréquences, ce qui correspond à l'augmentation de la synchronisation de

population de neurones localisées. Dans notre cas précis, elle se situe au niveau de FC5 qui correspond approximativement au cortex prémoteur et moteur. De plus, bien que les mouvements exécutés par les sujets soient bi-manuels, cette activation est latéralisée à gauche. Du fait de l'originalité de l'étude, nous n'avons pas pu référer à la littérature. Toutefois il est intéressant de remarquer qu'une synchronisation comportementale s'accompagne d'une synchronisation supplémentaire dans le cortex moteur ce qui rappelle le phénomène de résonance motrice et va dans le sens de la contamination motrice (Issartel, Marin et al. 2007; Richardson, Marsh et al. 2007).

Concernant l'imitation, il y a une augmentation nette de la synchronisation sur l'électrode Cz qui correspond approximativement à l'aire motrice supplémentaire (SMA) et une désynchronisation dans le pariétal droit. L'activation de la SMA bien que reliée à la coordination des gestes bi-manuels et également associée à la planification de mouvement. Des études en PET chez le macaque ont montré son implication dans le couplage perception-action (Fujii, Mushiake et al. 2002; Raos, Evangelidou et al. 2007). Le lobe pariétal a été démontré dans de nombreuses études en imagerie comme ayant un rôle important et à plusieurs niveaux dans le phénomène de l'imitation (Iacoboni, Woods et al. 1999; Chaminade and Decety 2002; Tanaka and Inui 2002; Chaminade, Meltzoff et al. 2005). Par son caractère multimodal, il est considéré comme jouant un rôle important dans la mise en correspondance des afférences visuelles avec les informations kinesthésiques et somato-sensorielles.

Nous avons ainsi, à l'aide de notre indexage comportemental, dissocié dans le phénomène de l'imitation synchrone les contributions respectives de la synchronisation comportementale, qui est du domaine temporel, et de l'imitation, qui s'apparente plus au domaine spatial. Les corrélats cérébraux relatifs à ces deux composantes sont en cohérence avec d'autres études. Toutefois, cette dissociation est tout à fait nouvelle.

Les premières analyses des synchronies de phase montrent que des synchronies inter-subjectives neuronales significatives existent. Elles se situent dans les basses fréquences et plus particulièrement dans la bande du Mu. Il est intéressant de mettre en relation ce résultat avec ceux des puissances. D'un point de vue fonctionnel, il semble en effet cohérent que les processus cognitifs liés à la synchronisation sociale interviennent dans les gammes de fréquences où les synchronies inter-subjectives ont lieu. De récentes études montrent d'ailleurs le rôle potentiel du Mu dans le système miroir (Oberman, Hubbard et al. 2005; Ulloa and Pineda 2007; Cheng, Lee et al. 2008).

## 6. Perspectives

Les résultats présentés ici vont permettre de poursuivre une analyse plus poussée du phénomène de l'imitation synchrone. Nous allons nous intéresser à divers aspects plus détaillés et approfondir les outils employés.

Les essais d'imitation induite, laissés à l'écart pour le moment, vont nous permettre d'identifier leur différence avec ceux d'imitation spontanée. La différence entre synchronie et imitation est ici primordiale. De plus, la dynamique attendue est totalement différente. Les cas d'imitation asynchrone et de synchronie sans imitation qui ont également été mis à l'écart dans un premier temps ont tout de même été indicés lors de l'analyse comportementale et pourront également faire l'objet d'une analyse plus détaillée. L'étude de la phase du mouvement peut être également intéressante et pourrait être mise en lien avec les études de Oullier et Issartel.

En relation avec l'article de Raos et son équipe (Raos, Evangeliou et al. 2007) sur la question de la simulation motrice et l'hypothèse d'un rappel en mémoire permettant l'apprentissage de l'action opposée à celle dites du "mirroring", il serait intéressant de regarder les différences mnésiques entre les période de Synchronie Imitation et celles de désynchronie en faisant le parallèle avec le Replay sur ces même intervalle.

D'un point de vue comportemental, la question de la performance dans l'imitation est également importante. La réalisation d'échelles psycho-comportementales pourrait être envisagée afin d'affiner le traitement des dyades. L'emploi des coefficients KAPPA de Cohen pour l'accord inter-observateur est également envisageable afin d'affiner encore plus la significativité des analyses comportementales.

Les outils d'analyses seront également approfondis. L'application d'algorithmes d'analyse du flux optique, introduits depuis peu par le LENA à l'imagerie cérébrale, ont donné des résultats prometteurs lors de leur utilisation sur les vidéos comportementales. Ceux-ci permettent, de manière automatique, l'extraction de paramètres du mouvement de l'image et permettraient non seulement un guidage de l'analyse comportementale mais également une prédiction de certains paramètres moteurs. L'application d'analyse ondelettes croisée a d'ors et déjà donné une approximation intéressante du délai d'imitation moyen entre les sujets.

L'analyse des synchronies est également à poursuivre. La proximité harmonique du Mu et du Beta pourrait conduire à des synchronies inter-bande de fréquences. Les matrices de connectivité obtenues après seuillage donnent également des informations topologiques très intéressantes pouvant être étudiées au moyen de la théorie des graphes.

Enfin, un plus grand nombre de sujets testés pourrait permettre une analyse statistique plus puissante. L'apprentissage des relations dynamiques entre les signaux au cours des imitations induites dans chacun des sens pourrait permettre à terme de prédire dans les imitations spontanées les phases de turn-taking.

## 7. Bibliographie

- Babiloni, F., F. Cincotti, et al. (2006). "Hypermethods for EEG hyperscanning." Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc **1**: 3666-9.
- Bigelow, A. E., & Decoste, C. (2003). "Sensitivity to social contingency from mothers and strangers in 2, 4-, and 6-month-old infants." Infancy **4**: 111-140.
- Brovelli, A., P. P. Battaglini, et al. (2002). "Medium-range oscillatory network and the 20-Hz sensorimotor induced potential." Neuroimage **16**(1): 130-41.
- Chaminade, T. and J. Decety (2002). "Leader or follower? Involvement of the inferior parietal lobule in agency." Neuroreport **13**(15): 1975-8.
- Chaminade, T., A. N. Meltzoff, et al. (2005). "An fMRI study of imitation: action representation and body schema." Neuropsychologia **43**(1): 115-27.
- Cheng, Y., P. L. Lee, et al. (2008). "Gender differences in the mu rhythm of the human mirror-neuron system." PLoS ONE **3**(5): e2113.
- Fujii, N., H. Mushiake, et al. (2002). "Distribution of eye- and arm-movement-related neuronal activity in the SEF and in the SMA and Pre-SMA of monkeys." J Neurophysiol **87**(4): 2158-66.
- Gergely, G., & Watson, J. S. (1999). Early social-emotional development: Contingency perception and the social-biofeedback model. Early social cognition: Understanding others in the first months of life. I. P. Rochat, Englewood Cliffs: 101-136.
- Gray, C. M., P. Konig, et al. (1989). "Oscillatory responses in cat visual cortex exhibit inter-columnar synchronization which reflects global stimulus properties." Nature **338**(6213): 334-7.
- Hasson, U., O. Furman, et al. (2008). "Enhanced Intersubject Correlations during Movie Viewing Correlate with Successful Episodic Encoding." Neuron **57**(3): 452-462.
- Iacoboni, M., R. P. Woods, et al. (1999). "Cortical mechanisms of human imitation." Science **286**(5449): 2526-8.
- Ikegami, T. and H. Iizuka (2007). "Turn-taking interaction as a cooperative and co-creative process." Infant Behav Dev **30**(2): 278-88.
- Ikegami, T., Iizuka H. (2007). Imitation and Social Learning in Robots, Humans and Animals: Behavioural, Social and Communicative Dimensions, Cambridge University Press.
- Ikegami, T. and G. Morimoto (2003). "Chaotic itinerancy in coupled dynamical recognizers." Chaos **13**(3): 1133-47.
- Issartel, J., L. Marin, et al. (2007). "Unintended interpersonal co-ordination: "can we march to the beat of our own drum?"" Neurosci Lett **411**(3): 174-9.
- Issartel, J., L. Marin, et al. (2006). "A practical guide to time-frequency analysis in the study of human motor behavior: the contribution of wavelet transform." J Mot Behav **38**(2): 139-59.
- Lachaux, J. P., E. Rodriguez, et al. (1999). "Measuring phase synchrony in brain signals." Hum Brain Mapp **8**(4): 194-208.
- Legerstee, M., & Varghese, J. (2001). "The role of maternal affect mirroring on social expectancies in three-month-old infants." Child Development **72**: 1301-1313.
- Maris, E., J. M. Schoffelen, et al. (2007). "Nonparametric statistical testing of coherence differences." J Neurosci Methods **163**(1): 161-75.
- Miller, K. J., E. C. Leuthardt, et al. (2007). "Spectral changes in cortical surface potentials during motor movement." J Neurosci **27**(9): 2424-32.
- Montague, P. R., G. S. Berns, et al. (2002). "Hyperscanning: simultaneous fMRI during linked social interactions." Neuroimage **16**(4): 1159-64.
- Murray, L., & Trevarthen, C. (1985). Emotional regulation of interaction between two-months-old and their mothers. Social perception in infancy. I. M. F. N. A. Fox, New Jersey: Ablex Publishing Corporation: 177-198.

- Nadel, J., Carchon, I., Kervella, C., Marcelli, D., & Reserbat-Plantey, D. (1999). "Expectancies for social contingency in 2-month-olds." Developmental Science **2**: 164-173.
- Nadel, J., Soussignan, R., Canet, P., Guillaume, L., & Gerardin, P. (2005). "Two-month-old infants of depressed mothers show mild, delayed and persistent change in emotional state after non-contingent interaction." Infant Behavior and Development **28**: 418-425.
- Nichols, T. E. and A. P. Holmes (2002). "Nonparametric permutation tests for functional neuroimaging: a primer with examples." Hum Brain Mapp **15**(1): 1-25.
- Oberman, L. M., E. M. Hubbard, et al. (2005). "EEG evidence for mirror neuron dysfunction in autism spectrum disorders." Brain Res Cogn Brain Res **24**(2): 190-8.
- Oullier, O., G. C. de Guzman, et al. (2007). "Social coordination dynamics: Measuring human bonding." Social Neuroscience **9999**(1): 1 - 15.
- Pantazis, D., T. E. Nichols, et al. (2003). "Spatiotemporal localization of significant activation in MEG using permutation tests." Inf Process Med Imaging **18**: 512-23.
- Pantazis, D., T. E. Nichols, et al. (2005). "A comparison of random field theory and permutation methods for the statistical analysis of MEG data." Neuroimage **25**(2): 383-94.
- Raos, V., M. N. Evangeliou, et al. (2007). "Mental simulation of action in the service of action perception." J Neurosci **27**(46): 12675-83.
- Richardson, M. J., K. L. Marsh, et al. (2007). "Rocking together: dynamics of intentional and unintentional interpersonal coordination." Hum Mov Sci **26**(6): 867-91.
- Soussignan, R., Nadel, J., Canet, P., and Gerardin, P. (2006). "Sensitivity to Social Contingency and Positive Emotion in 2-Month-Olds." Infancy **10**(2): 123-144.
- Stormack, K., & Braarud, H. (2004). "Infants' sensitivity to social contingency: a "double video" study of face-to-face communication between 2-to-4-month-olds and their mothers." Infant Behavior and Development, **27**: 195-203.
- Tanaka, S. and T. Inui (2002). "Cortical involvement for action imitation of hand/arm postures versus finger configurations: an fMRI study." Neuroreport **13**(13): 1599-602.
- Tognoli, E., J. Lagarde, et al. (2007). "The phi complex as a neuromarker of human social coordination." Proc Natl Acad Sci U S A **104**(19): 8190-5.
- Toyokura, M., I. Muro, et al. (2002). "Activation of pre-supplementary motor area (SMA) and SMA proper during unimanual and bimanual complex sequences: an analysis using functional magnetic resonance imaging." J Neuroimaging **12**(2): 172-8.
- Ulloa, E. R. and J. A. Pineda (2007). "Recognition of point-light biological motion: mu rhythms and mirror neuron activity." Behav Brain Res **183**(2): 188-94.
- Varela, F., J. P. Lachaux, et al. (2001). "The brainweb: phase synchronization and large-scale integration." Nat Rev Neurosci **2**(4): 229-39.
- Wallstrom, G. L., R. E. Kass, et al. (2004). "Automatic correction of ocular artifacts in the EEG: a comparison of regression-based and component-based methods." Int J Psychophysiol **53**(2): 105-19.
- Wilson, M. and T. P. Wilson (2005). "An oscillator model of the timing of turn-taking." Psychon Bull Rev **12**(6): 957-68.