



**HAL**  
open science

# Etude des processus neurophysiologiques mobilisés lors de l'observation d'actions motrices

Claire Calmels

► **To cite this version:**

Claire Calmels. Etude des processus neurophysiologiques mobilisés lors de l'observation d'actions motrices. [Rapport de recherche] N°06-027, Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance (INSEP). 2009. hal-01940346

**HAL Id: hal-01940346**

**<https://insep.hal.science//hal-01940346>**

Submitted on 30 Nov 2018

**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.

RAPPORT DE RECHERCHE  
N° 06-027 AVRIL 2009

COLLABORATEURS  
SCIENTIFIQUES

M. FOUTREN<sup>1</sup>  
M. HARS<sup>1,2</sup>  
G. JARRY<sup>3</sup>  
C. STAM<sup>4</sup>

COLLABORATEUR SPORTIF  
C. CARPENTIER<sup>1</sup>

TECHNICIEN  
M. PAISIEY<sup>1,2</sup>

TRAVAIL EFFECTUÉ PAR LA  
Mission Recherche de l'INSEP

EN COLLABORATION AVEC

<sup>1</sup> INSEP, Paris, France

<sup>2</sup> Université de Reims  
Champagne-Ardenne,  
Reims, France

<sup>3</sup> Hôpital H. Mondor, Service  
des Explorations Fonctionnelles,  
Créteil, France

<sup>4</sup> Department of Clinical  
Neurophysiology, VU University  
Medical Centre,  
Amsterdam, the Netherlands

<sup>5</sup> Université de Paris XI, France



# INSEP

MISSION RECHERCHE

Laboratoire Mouvement, Action, et Performance

## ÉTUDE DES PROCESSUS NEUROPHYSIOLOGIQUES MOBILISÉS LORS DE L'OBSERVATION D' ACTIONS MOTRICES

CLAIRE CALMELS



---

## Remerciements

Le projet intitulé «Etude des Processus Neurophysiologiques Mobilisés lors de l'Observation d'Actions Motrices» a été soutenu financièrement par le Ministère de la Santé et des Sports, Secrétariat d'Etat aux Sports.

Les auteurs de ce rapport remercient sincèrement les sportifs de haut niveau de l'INSEP et les pianistes professionnels de la région parisienne pour leur participation volontaire et active à ce projet.

Plus particulièrement, merci à :

Mickael Afriat, Coralie Amedjkane, Ricardo Araujo, Rida Bel-lahsen, Gilles Boulay, Remy Bousseau, Marie Cali, Nacera Cheman, Bianca Chillemi, Eve Daniel, Leslie Decker, Yoann Demaiziere, Jessica Deshayes, Sylvain Dorel, Raphaël Doub, John Dovi, Charlotte Dumoulin, Pascal Gagneux, Nathalie Gastineau, Yvan Garcia, Perrine Gauthier, Mélanie Hars, Sébastien Homo, Francois Hug, Cécile Huiban, Marion Jacquard, Alexia Komly, Sébastien Laifa, Céline Lévèque, Marine L'huillier, Amara Maamouli, Benjamin Maze, Faustine Merret, Sylvie Pérez, Olivier Pino, Thomas Prat, Jeremy Prévotiaux, Damien Rivière, Jan Robijns, Alexandre Roche, Gregory Saint-Genies, Alain Sainthuile, Liv Sansoz, Laetitia Sebert, Yann Siccardi, Mickael Simon, Jean Slawinski, Marc Sourty, Ingrid Stutz, Soizic Toutirais, Timothé Urbain, Vincent Vidal.

---

## SOMMAIRE

<b>Introduction Générale</b> .....	4
<b>1<sup>ère</sup> étude. Synchronisation EEG lors de l'Observation : Effets des Instructions et de l'Expertise</b> .....	7
<b>Introduction</b> .....	8
<b>Hypothèses</b> .....	11
<b>Méthodologie</b> .....	13
Sujets .....	13
Tâche expérimentale .....	13
Procédure expérimentale .....	14
<i>Observation dans un but de reproduction</i> .....	14
<i>Observation dans un but de reconnaissance</i> .....	16
<i>Condition contrôle</i> .....	16
Enregistrement EEG .....	17
Index de synchronisation .....	17
Traitement des données .....	18
<i>Segmentation des essais EEG</i> .....	18
<i>Correction des artéfacts oculaires</i> .....	18
<i>Calcul des SL</i> .....	19
Analyses statistiques .....	19
<b>Résultats</b> .....	23
Résultats comportementaux .....	23
Index de synchronisation .....	23
<b>Discussion</b> .....	27
Observation dans un but de reproduction et de reconnaissance chez les sujets sans expérience musicale .....	27
Observation dans un but de reproduction et de reconnaissance chez les pianistes professionnels .....	32
Observation dans un but de reproduction chez les sujets sans expérience musicale et les pianistes professionnels .....	34
<b>Conclusion</b> .....	36
<b>Références</b> .....	37
<b>Debriefing envoyé aux participants de l'étude intitulé : Synchronisation EEG lors de l'Observation : Effets des Instructions et de l'Expertise.....</b>	44
<b>2<sup>ème</sup> étude : Mécanismes EEG Impliqués lors de la Mémorisation de Mouvements : Effets des Instructions et de l'Expertise.....</b>	47
<b>Introduction</b> .....	48
Observation .....	48
Rétention .....	49
<i>Tâches de reproduction ou de rappel</i> .....	50
<i>Tâches de reconnaissance</i> .....	51
Expertise .....	52
<b>Objet d'étude</b> .....	53
<b>Hypothèses</b> .....	53
<b>Méthodologie</b> .....	55
Sujets .....	55
Tâches expérimentales .....	55
Procédure expérimentale .....	56
<i>Première étape : acquisition des données EEG</i> .....	56



---

## INTRODUCTION GENERALE

Il est de plus en plus habituel d'observer, sur les terrains de sport, les sportifs (de haut niveau) visionner des vidéos de leur performance. Cette pratique leur permet d'améliorer et d'évaluer l'exécution technique de leur prestation, d'exécuter et de développer des stratégies, ou d'optimiser leur performance via la régulation de leurs états mentaux (Calmels et al., 2005; Hars et Calmels, 2007). Plus spécifiquement, deux raisons ont été majoritairement rapportées par ces athlètes : observer leur prestation dans le but de l'améliorer mais également dans le but de l'évaluer. Dès lors, nous pouvons nous interroger sur les mécanismes, c'est-à-dire sur les caractéristiques opérationnelles du processus attentionnel, impliqués dans ces deux types d'observation. La nature des informations prélevées par l'individu en situation d'observation et la manière dont elles sont traitées sont-elles similaires ou non en fonction du but de l'observation?

Dans le domaine des neurosciences, quelques équipes se sont penchées sur cette problématique (e.g., Decety et al., 1997; Grèzes et al., 1998). Elles ont utilisé des techniques de neuroimagerie cognitive, telles que la tomographie par émission de positons (TEP). Ces auteurs ont mis en évidence des activations corticales différentes en fonction du but de l'observation. Par exemple, Decety et al. (1997) ont mis en évidence l'implication du cortex préfrontal dorsolatéral et de l'aire motrice supplémentaire lorsque des individus étaient invités à observer un mouvement dans le but de le répliquer ensuite. Le gyrus droit parahippocampique, lui, était stimulé lorsque ces mêmes individus observaient un mouvement avec l'objectif de le reconnaître ultérieurement.

L'implication de régions corticales différentes lors de situations d'observation dont le but diffère nous amène légitimement à penser qu'au cours du temps les rythmes cérébraux seraient également susceptibles d'être distincts. Observer une action dans le but de la reproduire ou de la reconnaître génèrerait donc des phénomènes oscillatoires différents lors de

---

la phase d'observation. Cette problématique, à notre connaissance, n'a jamais été examinée et mériterait d'être investiguée.

Prendre en considération la manière dont sont traitées les informations collectées lors de l'observation de mouvements nous semble également une thématique digne d'intérêt, non traitée dans la littérature.

Améliorer sa performance, indépendamment du domaine considéré, est une préoccupation de l'être humain. Pour cela, identifier les déterminants de la performance pourrait apporter une aide dans cette quête. Comparer des experts et des non experts, c'est-à-dire des novices, pourrait constituer un moyen d'y parvenir. C'est pourquoi l'objet du présent rapport de recherche a été de considérer l'expertise des «sujets-observateurs» et son influence sur les processus concomitants et consécutifs détectés lors de situations d'observation dont le but différait.

Deux études ont composé ce rapport. La première était intitulée : «Synchronisation EEG lors de l'observation : effets des instructions et de l'expertise.» La seconde traitait des «Mécanismes EEG impliqués lors de la mémorisation de mouvements : effets des instructions et de l'expertise.»

L'électroencéphalographie (EEG) a été la méthode retenue car cette méthode présente une bonne résolution temporelle qui permet d'appréhender le déroulement temporel d'événements particuliers. Les tâches expérimentales étaient des mouvements digitaux, actions, nous le reconnaissons, bien éloignées des réalités du monde sportif. Ces tâches ont été choisies en fonction de la technique EEG qui est une technique très sensible aux artéfacts musculaires. Si un tracé est trop artéfacté, il ne peut être analysé. Les mouvements des doigts, étant de faible amplitude et étant réalisés loin des électrodes situées sur le scalp, ont permis d'éviter l'apparition d'artéfacts mécanographiques sur les tracés EEG et ont ainsi autorisé l'analyse des données. Le choix de la population d'étude a donc découlé des contraintes précédemment évoquées. La population était constituée de sportifs de haut niveau de l'INSEP et de pianistes

---

professionnels. Les sportifs étaient considérés comme des sujets non experts, c'est-à-dire ne possédant pas une grande habileté au niveau de la dextérité manuelle, contrairement aux pianistes, qui eux, représentaient la population experte. La population ayant participé à ce projet de recherche s'élevait initialement à 53 sujets. Seules les données de 23 sujets ont pu être exploitées; les données des 30 autres sujets présentant des artefacts importants impossibles à corriger.

Enfin, ce projet s'est inscrit dans un programme de recherche financé par le Ministère de la Santé et des Sports, Secrétariat d'Etat aux Sports. Il s'est basé : (i) sur une collaboration scientifique entre le Laboratoire Mouvement Action et Performance de la Mission Recherche de l'INSEP, le Service des Explorations Fonctionnelles de l'hôpital Henri Mondor de Créteil, le Département de Neurophysiologie Clinique d'Amsterdam, et (ii) sur une collaboration entre différents services de l'INSEP (i.e., Unité de Formation Audiovisuelle et des Interventions et le Département du Sport de Haut Niveau). Les résultats de ce rapport vont donner lieu à la soutenance d'un mémoire de M2 (Marion Foutren, 2009) et d'une thèse (Magaly Hars, 2010). Deux articles scientifiques soumis dans des revues internationales et indexées sont actuellement en révision (voir Annexe 1).

## Références

Calmels, C., Hars, Arripe-Longueville, F. (d'), Macquet, A-C., & Iteanu, M. (2005). *Amélioration de l'apprentissage par observation en gymnastique féminine de haut niveau : contribution du logiciel «Dart Trainer» et de la technique d'auto-confrontation*. Rapport de recherche n° 03-009 non publié pour le Ministère de la Jeunesse, des Sports et de la Vie Associative.

Decety, J., Grèzes, J., Costes, N., Perani, D., Jeannerod, M., Procyk, E., Grassi, F., & Fazio, F. (1997). Brain activity during observation of actions. Influence of action content and subject's strategy. *Brain*, 120, 1763-1777.

Grèzes, J., Costes, N., & Decety, J. (1998). Top-down effect of strategy on the perception of human biological motion: a PET investigation. *Cognitive Neuropsychology*, 15, 553-582.

Hars, M., & Calmels, C. (2007). Observation of elite gymnastic performance: Processes and causation. *Psychology of Sport and Exercise*, 8, 337-354.

---

## **1<sup>ère</sup> étude :**

### **SYNCHRONISATION EEG LORS DE L'OBSERVATION : EFFETS DES INSTRUCTIONS ET DE L'EXPERTISE**

Calmels, C., Hars, M., Jarry, G., & Stam, C.J. (in revision). Non linear EEG synchronization during observations: Effects of instructions and expertise. *NeuroImage*.

---

## Introduction

La découverte des neurones miroirs (Di Pellegrino et al., 1992; Rizzolatti et al., 1988) a suscité, ces dernières années, un regain d'intérêt pour l'étude des processus d'observation. De nombreuses recherches relatives à l'observation et à l'imitation ont été menées dans le champ des neurosciences (e.g., Calvo-Merino et al., 2005, 2006; Decety et al., 1997; Grèzes et al., 1998; Haslinger et al., 2005; Iacoboni et al., 1999; Makuuchi, 2005; Muthukumaraswamy et al., 2004; Zentgraf et al., 2005). Cependant, à l'exception des travaux réalisés par Decety et al. (1997), Grèzes et al. (1998), et Zentgraf et al. (2005), l'influence de la nature des instructions données avant l'observation de mouvements biologiques sur l'activité cérébrale n'a pas été largement investiguée. Decety et al. (1997) et Grèzes et al. (1998) ont été les premiers à considérer ce facteur. Ils ont étudié, via la tomographie par émission de positrons (TEP), le réseau neuronal impliqué lorsque des sujets étaient invités à observer une action dans le but de la répliquer ultérieurement, de la reconnaître, ou de l'observer passivement (i.e., sans qu'aucune instruction n'ait été donnée). Ils ont également manipulé le contenu sémantique des actions en proposant aux individus de regarder des actions significatives pour eux (i.e., action familière pour l'individu; e.g., pantomimes d'actions transitives) ou des actions dénuées de sens (i.e., action inconnue ou non familière pour l'individu; e.g., actions émanant de la langue des signes américaine). Ces auteurs ont constaté que les instructions prodiguées avant la session d'observation et que la signification de ces actions pour un individu induisaient des changements dans les profils neuronaux. Plus spécifiquement, Grèzes et al. (1998) ont montré qu'observer sans consigne précise des actions, que celles-ci soient significatives ou non pour l'individu, activait un réseau cortical identique et des régions spécifiques. Le gyrus frontal inférieur gauche et le gyrus fusiforme gauche étaient mis en jeu lors de l'observation d'actions significatives tandis que la voie dorsale et le cervelet droit l'étaient lors de l'observation d'actions dénuées de sens. Plus récemment, Zentgraf et al.

---

(2005) ont utilisé l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) lors de l'observation de mouvements gymniques impliquant la totalité du corps. Deux modes d'observation où les instructions différaient étaient distinguées : observer dans un but de reproduction et observer dans un but d'évaluation. Ces auteurs ont montré des différences fonctionnelles de la pré-AMS et de l'AMS « propre » à travers la comparaison des deux conditions d'observation. Plus spécifiquement, une activation plus importante de l'AMS « propre » a été mise en évidence lors la condition d'observation dans un but de reproduction. Un pattern inverse a été observé au niveau de la pré-AMS. Elle était plus fortement activée sous la condition d'observation dans un but d'évaluation.

Peu de recherches ont examiné les bases neurales de l'observation en considérant l'expertise des individus dans un champ particulier (Babiloni et al., accepté; Calvo-Merino et al., 2005, 2006; Haslinger et al., 2005). L'expertise reflète un haut niveau de performance dans un domaine spécifique, acquis suite à un engagement long et intense (Ericsson et al., 1993). Calvo-Merino et al. (2006) ont montré que le degré d'activation du cortex prémoteur, du cortex pariétal, et du cervelet était lié à l'expertise motrice de l'observateur. Des activations plus importantes des zones mentionnées ci-dessus étaient relevées chez des danseurs experts lors de l'observation de prestations habituellement réalisées physiquement par ces sujets, alors que pour des mouvements qu'ils avaient l'habitude de regarder mais qui n'appartenaient pas à leur répertoire gestuel, ces activations étaient moindres. Haslinger et al. (2005) ont trouvé des résultats similaires à ceux de Calvo-Merino et al. (2006) dans le domaine de la musique et avec l'utilisation de l'IRMf. Ils ont examiné les activations corticales mises en jeu par des pianistes experts, et des sujets sans expérience musicale, lors de l'observation passive de mouvements digitaux présentant des similarités plus ou moins importantes avec une séquence motrice pianistique (i.e., main en supination ou en pronation, sons associés ou non à ces mouvements). Très récemment, Babiloni et al. (accepté), via l'électroencéphalographie (EEG), ont étudié l'activité corticale lorsque des gymnastes

---

pratiquant la gymnastique rythmique à haut niveau et des jeunes filles sédentaires observaient des séquences gymniques dans le but de les juger, de les noter. Ils ont mis en évidence, dans les bandes de fréquence alpha, une activation corticale plus importante chez les non-gymnastes au niveau des voies ventrale et dorsale.

A notre connaissance, au regard de la littérature existante, aucune étude n'a pris en compte les deux variables mentionnées ci-dessus (i.e., nature des instructions et niveau d'expertise) dans l'investigation des processus neuronaux de l'observation. Plus spécifiquement, examiner les activités rythmiques cérébrales dans les zones motrices mériterait d'être considéré lorsque des individus experts et non-experts dans une activité motrice particulière observent une action dans le but de la reproduire ou de la reconnaître ultérieurement. Tel était le but de la présente étude.

Les experts ont été choisis parmi une population de pianistes professionnels. Le choix de cette population spécifique a été opéré pour deux raisons. Premièrement, les pianistes sont des individus experts possédant une dextérité manuelle qui a été acquise à travers leur formation musicale quotidienne. Deuxièmement, le mouvement des doigts est une tâche qui est parfaitement appropriée aux contraintes de l'EEG. Elle permet de recueillir des données au cours de l'exécution d'un mouvement. Les mouvements des doigts ayant été réalisés loin des électrodes placées sur le scalp, aucun artefact mécanographique n'a été généré (Derambure et al., 1999). Les activités rythmiques cérébrales ont été étudiées avec la mesure de l'index de synchronisation (SL) (i.e., synchronization likelihood) permettant d'estimer les corrélations linéaires et non linéaires entre les différentes régions corticales (Montez et al., 2006; Stam & van Dijk, 2002).

---

## Hypothèses

La première hypothèse soutenue est que, chez les sujets sans expérience musicale, le couplage fonctionnel lors de l'observation d'une action dans un but de reproduction serait plus important que lors de l'observation dans un but de reconnaissance. Lors de l'observation avec une exigence de réplique ultérieure, la transformation de l'information visuelle en une ou des sorties motrices nécessiterait le recrutement supplémentaire d'un pool de neurones qui générerait des demandes cognitives plus importantes comparées à celles identifiées lors d'une situation d'observation où le but serait la reconnaissance. Dans ce dernier cas, une telle transformation serait inutile (Zentgraf et al., 2005). Il est également postulé qu'aucune différence significative au niveau du couplage fonctionnel ne soit mise en évidence lors des deux conditions d'observation chez les pianistes professionnels. Les pianistes sont des personnes habituées quotidiennement à traiter la transformation visuo-motrice (Palmer, 1997) et n'éprouveraient donc pas le besoin de recruter des neurones supplémentaires lors de l'observation dans un but de reproduction. En conséquence, il a été également prédit que l'observation dans un but de reproduction chez les sujets sans expérience musicale engendrerait un couplage fonctionnel plus important que l'observation dans un but de reproduction chez les pianistes professionnels. Des modifications du couplage fonctionnel étaient principalement attendues dans la bande de fréquence thêta (4-8 Hz) et les bandes alpha (8-13 Hz), les oscillations dans ces deux bandes jouant un rôle important dans l'encodage des informations (Klimesch, 1999; Sauseng et al., 2002, 2005). De plus, des patterns inverses de couplage pourraient être observés entre les bandes thêta et alpha. Il est effectivement communément admis par la communauté scientifique que, lors d'une activité mentale, l'activité EEG alpha désynchronise (i.e., diminution de puissance) tandis que l'activité EEG thêta synchronise (i.e., augmentation de puissance) (Klimesch, 1996, 1999; Klimesch et al.,

---

1997a). Les régions connues pour constituer les composantes basiques du système moteur ont été considérées.

---

## Méthodologie

### Sujets

Onze pianistes professionnels (huit hommes et trois femmes;  $M=26.63$ ,  $SD=4.99$ ) et douze sujets ne possédant aucune expérience musicale (huit hommes et quatre femmes;  $M=24.79$ ,  $SD=3.61$ ) ont participé à l'étude. Les pianistes professionnels possédaient au minimum dix années d'expérience et pratiquaient leur instrument à raison de vingt-cinq heures hebdomadaire. Tous les sujets étaient droitiers selon les normes de l'inventaire de latéralité de Edinburgh (Oldfield, 1971) (Voir Annexe2) et ne présentaient aucun antécédent neurologique et psychiatrique. Tous les sujets ont pris part à l'étude de manière volontaire après avoir rempli un formulaire de consentement (Voir Annexe 3). Ils étaient également naïfs quant aux objectifs de l'étude. L'étude a été approuvée par Comité d'Ethique Local de l'hôpital Henri Mondor.

### Tâche expérimentale

La tâche consistait à effectuer une séquence de mouvement digitaux, et plus précisément à toucher avec l'extrémité du pouce droit, le bout des autres doigts de la main droite, qui était posée sur un oreiller en position supinoire. La tâche se composait de quatre contacts des doigts réalisés à une fréquence de 2 Hz. Quarante séquences de mouvements distincts ont été utilisées. Les contacts digitaux ont été randomisés et un même doigt n'a pas été en contact deux fois de suite (e.g., 4321, 1321, 3421, ...); 1 correspondant à l'index, 2 au majeur, 3 à l'annulaire, et 4 à l'auriculaire.

---

Cette action a été choisie car, étant de faible amplitude et étant réalisée loin des électrodes situées sur le scalp, elle permettait d'éviter l'apparition d'artéfacts mécanographiques sur le tracé EEG (Derambure et al., 1999).

### **Procédure expérimentale**

Les sujets ont été testés individuellement et ont été soumis à trois conditions différentes au cours desquelles un enregistrement EEG a été effectué : (a) une condition d'observation de l'action dans le but de reproduire l'action observée, (b) une condition d'observation de l'action dans le but de reconnaître l'action observée, et (c) une condition contrôle.

Pendant l'enregistrement, les sujets ont été invités à adopter une posture relâchée. Ils étaient assis dans un fauteuil dans une pièce sombre, leurs avant-bras en pronation reposant sur les accoudoirs. Afin de réduire les mouvements oculaires lors de l'enregistrement des données EEG, les individus ont été invités à fixer leur attention sur un point placé sur l'écran situé à 1m30, à garder leur mâchoire relâchée, et à éviter de cligner des yeux.

#### ***Observation dans un but de reproduction***

Chaque sujet a observé 40 séquences de mouvements digitaux dans le but de les reproduire. Chaque séquence a été intégrée dans un ensemble composé de cinq phases qui ont constitué un essai. Lors de la première phase de chaque essai, d'une durée de 4 secondes, le sujet regardait un écran bleu. Deux secondes après le début de cette phase, le mot « faire » apparaissait à l'écran et invitait le sujet à observer l'action dans le but de la reproduire dans une phase ultérieure. Lors de la seconde phase, qui durait 3.24 secondes, le sujet observait une vidéo au cours de laquelle la main d'une tierce personne réalisait une séquence de mouvements digitaux à la fréquence de 2Hz. Cette phase s'est vue attribuer une durée de 3.24 secondes car deux périodes de 505ms ont été ajoutées avant le début de l'action et après la fin

de l'exécution de l'action. Ces périodes ont été incluses afin de permettre au sujet de s'appropriier le contexte et d'éviter les changements d'images vidéo trop brusques. Lors de la troisième phase, de 3.76 secondes, un fond orange apparaissait sur l'écran, invitant le sujet à rester concentré. Dans la quatrième phase, d'une durée de 3.24 secondes, un écran noir invitait le sujet à reproduire la séquence de mouvements digitaux qu'il avait observée lors de la seconde phase. Alors que le sujet effectuait les mouvements digitaux, l'expérimentateur appréciait l'exactitude des mouvements reproduits. Les séquences reproduites de manière incorrecte n'ont pas été retenues dans le cadre de la présente étude. Lors de la cinquième phase, qui durait 6 secondes, un fond rouge indiquait au sujet qu'il pouvait se détendre, cligner des yeux s'il le désirait, et ne penser à rien. L'intervalle de temps entre le début de l'observation de la vidéo de l'action et la vidéo suivante était donc de 20.24 secondes (voir Figure 1).

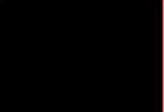
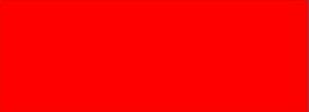
Phases	Phase 1	Phase 2 (observation)	Phase 3	Phase 4 (observation ou exécution)	Phase 5 (repos)
Durée des phases	4 s	3.24 s	3.76 s	3.24 s	6 s
Condition d'observation dans un but de reproduction	<b>FAIRE</b>				
Condition d'observation dans un but de reconnaissance	<b>RECONNAITRE</b>				<b>REPENDRE</b>
Condition contrôle					

Figure 1. Décours temporel d'un essai dans les trois conditions (i.e., condition d'observation dans un but de reproduction, condition d'observation dans un but de reconnaissance, et condition contrôle)

---

### ***Observation dans un but de reconnaissance***

Lors de cette condition, les 40 essais suivaient un protocole similaire au précédent. Cependant lors de la première phase, le mot « reconnaître » apparaissait sur l'écran bleu et invitait le sujet à observer l'action dans le but de la reconnaître dans une phase ultérieure. La quatrième phase était également différente. Une vidéo était présentée au sujet. Cette vidéo était similaire ou différente de celle observée lors de la deuxième phase. 50% des vidéos étaient identiques. Au début de la cinquième phase, le mot « répondre » apparaissait pendant 2 secondes sur l'écran rouge, et invitait le sujet à serrer son poing si la deuxième vidéo était différente de la première. S'il s'agissait de la même vidéo, le sujet devait ne rien faire. Seules les réponses correctes ont été retenues dans l'analyse.

### ***Condition contrôle***

Cette condition suivait le même protocole que celui des conditions précédentes. Cependant, au lieu d'observer des séquences de mouvements durant la seconde et la quatrième phases, le sujet observait un oreiller pendant ces deux périodes de 3.24 secondes (voir Figure 1)

Un trigger ou déclencheur a été inséré lors de chaque essai. Il a permis de signaler les changements de couleur de l'écran, via une photodiode PIN ( i.e., composant semi-conducteur ayant la capacité de détecter un rayonnement optique et de le transformer en signal électrique) en mode photovoltaïque.

Quatre blocs de 10 minutes comprenant 30 essais étaient réalisés pour chaque sujet. Une période de repos de 5 minutes a été octroyée entre chaque bloc. L'ordre des 120 essais a été randomisé. Pendant toutes les phases, exceptées celles de reproduction et de réponse, l'expérimentateur a vérifié que les doigts du sujet ne bougeaient pas.

---

## Enregistrement EEG

L'activité électrique cérébrale a été enregistrée à partir de 19 électrodes fixées sur un bonnet élastique en lycra (Electro-cap International, Eaton, Ohio, USA) selon un montage monopolaire matriciel inspiré du système international de positionnement 10-20 (Jasper 1958): Fp1, Fp2, FZ, F7,F8,F3,F4,CZ, C3, C4, PZ, P3, P4, T3, T4, T5, T6, O1, O2. Deux électrodes de référence ont été placées sur les mastoïdes droite et gauche du sujet (i.e., M1, M2) et deux électrodes de terre ont été positionnées sur le front (i.e., G1, G2). L'activité électrique propre aux mouvements verticaux (VOEG) et horizontaux (HOEG) des yeux a été également enregistrée afin d'éliminer, hors enregistrement, les essais contaminés par des artefacts. Pour la détection des mouvements horizontaux des yeux, une paire d'électrodes a donc été placée près du canthus externe de chaque œil (placement binoculaire) et pour l'enregistrement des mouvements oculaires verticaux, 2 électrodes ont été fixées en dessus et en dessous de l'œil droit.

Les impédances des électrodes étaient toutes inférieures à  $5k\Omega$  tout au long de l'expérimentation. Elles ont été vérifiées au début de chaque bloc de l'expérimentation. L'amplificateur EEG était un amplificateur de marque Deltamed. La bande passante était de 0.15 à 114 Hz et était échantillonnée à la fréquence de 256 Hz.

## Index de synchronisation (« Synchronization Likelihood »)

L'index de synchronisation est une mesure générale qui estime les corrélations linéaires et non linéaires entre deux signaux EEG (Montez et al., 2006; Stam et van Dijk, 2002). Cet index correspond à une mesure de synchronisation entre deux systèmes dynamiques  $X$  et  $Y$ , et dans le cas de l'EEG entre deux séries temporelles issues de deux sites corticaux (électrodes EEG). La synchronisation entre  $X$  et  $Y$  est définie comme la probabilité que l'état d'un système soit fonction de l'état d'un autre système c'est-à-dire  $Y=F(X)$ . Une synchronisation existe entre un système  $X$  et un système  $Y$  si et seulement si  $X$  est dans le même état aux temps

---

$i$  et  $j$ , alors  $Y$  sera également dans le même état aux temps  $i$  et  $j$ . Les valeurs de SL s'échelonnent dans une fourchette allant de 0 à 1. 1 correspond à une synchronisation maximale et 0 à une absence de synchronisation.

### **Traitement des données**

Les données EEG ont été analysées dans cinq bandes de fréquence: 4-8 Hz, 8-10 Hz, 10-13 Hz, 13-20 Hz, et 20-30 Hz. Le traitement des données s'est composé de trois phases : (a) la segmentation des essais EEG, (b) la correction des artéfacts oculaires, et (c) le calcul des SL.

#### ***Segmentation des essais EEG***

30 essais ont été réalisés durant chaque bloc de 10 mn. Chaque essai s'est composé de cinq phases. L'examen « off-line » de la première phase a révélé la présence d'artéfacts musculaires qui ont contaminé les données lors de la première seconde de certains essais. En conséquence, cette phase a été réduite de 4 s à 3 s et la première seconde n'a pas été prise en compte. La cinquième phase, qui invitait le sujet à se relaxer, n'a pas été considérée; cette phase contenant un nombre important d'artéfacts oculaires et musculaires. Au final, quatre phases ont été discernées pour chaque essai: la première phase (0-3 s), la seconde phase (3-6<sup>24</sup> s), la troisième phase (6<sup>24</sup>- 10 s), et la quatrième phase (10-13<sup>24</sup> s). Seule la seconde phase (3-6<sup>24</sup> s) a été retenue pour l'analyse EEG (voir Figure 1).

#### ***Correction des artéfacts oculaires***

La correction des artéfacts s'est composée de deux étapes. Premièrement, une inspection off-line des différentes phases des essais a été réalisée pour repérer les artéfacts oculaires qui ont été corrigés par la méthode de Semlitsch et al. (1986). Le principe de cette méthode est de soustraire une fraction de l'électro-oculogramme (EOG) des tracés EEG. Plus spécifiquement, une analyse de régression associée à un moyennage des artéfacts a été effectuée. Cette

---

opération a été réalisée avec le logiciel Neuroscan 4.1 (Revision A, 1999). Les paramètres suivants ont été sélectionnés : trigger : direction positive, seuil : 20%; valeur de clignement des paupières : minimum 2 sweeps, durée moyenne des artéfacts : 400 ms, VEOG : site d'électrode choisi pour ce calcul; révision : cocher maximum et clignement des yeux; et sortie : LDR + CNT.

### ***Calcul des SL***

L'index de synchronisation a été calculé pour les 171 paires d'électrodes, pour la seconde phase, pour chacun des 40 essais des trois conditions, pour chaque sujet, et bande de fréquence. Les 171 paires d'électrodes ont constitué l'ensemble des combinaisons possibles entre les 19 sites d'électrodes considérés. Les valeurs de SL de ces 171 paires ont été ensuite moyennées pour les 40 essais, et ce pour chaque sujet, condition, et bande de fréquence. Les paramètres pour le calcul de l'index de synchronisation étaient : 1 pour le « lag », 8 pour la « dimension embedding », 8 pour la « Theiler correction » ( $w_1$ ), 1 pour  $w_2$ , 0.010 pour Pref, et 1 pour la vitesse. Afin de diminuer la variabilité entre les sujets et les paires d'électrodes, la valeur de SL sous la condition contrôle a été soustraite de la valeur de SL sous la condition d'observation (i.e.,  $SL_{\text{condition d'observation}} - SL_{\text{condition contrôle}}$ ) pour obtenir une valeur finale de SL (i.e.,  $SL_{\text{finale}}$ ) soit positive, et qui traduisait une augmentation de la SL, soit négative, et qui reflétait une diminution de la SL. Cette opération, couramment utilisée dans la littérature, a été par exemple réalisée par Manganotti et al. (1998) ou encore Gerloff et al. (1998).

### **Analyses statistiques**

L'ensemble des analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Statistica 7.1. Seuls les neuf sites d'électrodes (i.e., F4, F3, C4, C3, P4, P3, FZ, CZ, et PZ) ont été considérées dans la présente étude. Ce choix s'est expliqué par plusieurs raisons. La première est que ces neuf électrodes recouvraient les régions fortement impliquées lors de la

---

réalisation d'actions motrices séquentielles (Choi et al., 2001; Rizzolatti et al., 2002). Deuxièmement, les sites d'électrodes présentaient des valeurs de SL plus élevées sous les conditions d'observation et d'exécution de mouvements digitaux (Calmels et al., 2006). Enfin, ces sites généraient également des patterns EEG, lors de l'observation d'actions digitales, voisins de ceux relevés lors de l'exécution de ces mêmes actions (Babiloni et al., 2002; Calmels et al., 2008).

A partir de ces neuf sites d'électrodes, deux zones ont été distinguées: (a) une zone fronto-centrale composée des sites C4, C3, FZ, et CZ, et (b) une zone fronto-pariétale incluant les sites F4, F3, P4, P3 et PZ. La zone fronto-centrale, comprenant le cortex prémoteur, le cortex sensorimoteur primaire, et le cortex frontal mésial, a constitué, bien souvent, une région privilégiée dans l'étude des phénomènes électrocorticaux lors de l'exécution d'actions (Andres et al., 1999; Gerloff et al., 1998; Manganotti et al., 1998; Toma et al., 2002). De plus, l'aire motrice supplémentaire (AMS), est reconnue comme étant la région de la représentation de la main (Chainay et al., 2004). Enfin, il est établi dans la communauté scientifique que les régions frontales et pariétales sont connectées entre elles pour permettre la transformation d'informations sensorielles en action (Matelli et Luppino, 2000; Rizzolatti et al., 1998). Ces régions sont également activées lorsqu'un individu observe des actions réalisées avec les mains (Rizzolatti et Craighero, 2004; Rizzolatti et al., 2002).

Dans la présente étude, les connexions entre les divers sites d'électrodes ont été considérées au sein de chaque zone et entre ces deux zones. Plus précisément, dans la zone fronto-centrale, six paires d'électrodes ont été répertoriés (C4-C3, C4-FZ, C4-CZ, C3-FZ, C3-CZ, FZ-CZ). Au niveau de la zone fronto-pariétale, dix paires d'électrodes ont été recensées (F4-F3, F4-P4, F4-P3, F4-PZ, F3-P4, F3-P3, F3-PZ, P4-P3, P4-PZ, P3-PZ) et 20 paires ont été mises en évidence entre les 2 zones (F4-C4, F4-C3, F4-FZ, F4-CZ, F3-C4, F3-C3, F3-FZ, F3-CZ, C4-P4, C4-P3, C4-PZ, C3-P4, C3-P3, C3-PZ, P4-FZ, P4-CZ, P3-FZ, P3-CZ, FZ-PZ, CZ-PZ) (voir Figure 2).

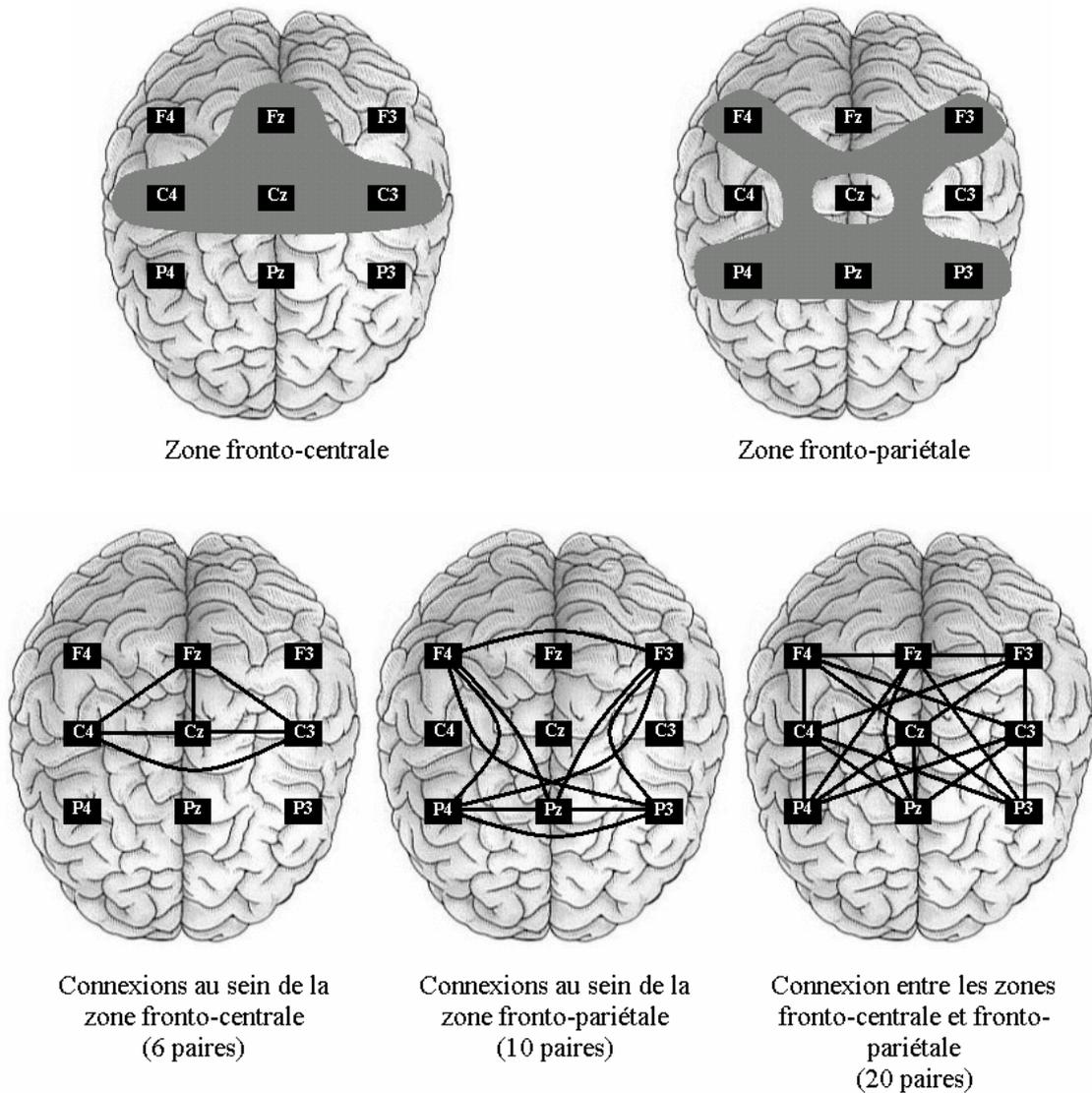


Figure 2. Le haut de la figure représente les deux zones considérées (i.e., zone fronto-centrale et zone fronto-pariétale). Le bas de la figure indique les connexions au sein de chaque zone et entre ces deux zones.

Pour chacune des cinq bandes de fréquence et chaque sujet, la moyenne des six valeurs de SL de la zone fronto-centrale a été réalisée afin d’obtenir une valeur de SL globale pour cette zone. Cette opération a également été effectuée pour les 10 valeurs de SL de la zone fronto-pariétale, et les 20 valeurs entre les zones fronto-centrale et fronto-pariétale.

2 (conditions) x 2 (groupes) MANOVAs ont été réalisées pour la zone fronto-centrale et la zone fronto-pariétale. Concernant la connexion entre les zones fronto-centrale et fronto-pariétale, 2 (conditions) x 2 (groupes) MANOVAs ont également été effectuées. Un facteur

---

intra-groupe : condition (deux niveaux: observation dans un but de reproduction, observation dans un but de reconnaissance) et un facteur inter-sujet : groupe (deux niveaux: sujets sans expérience musicale, pianistes professionnels) étaient distingués. Des tests post-hoc (LSD de Fisher) ont été appliqués lorsque les résultats des MANOVAs se sont révélés être significatifs. La normalité de la distribution des données a également été vérifiée avec l'aide du test de Kolmogorov-Smirnov, avant de réaliser les MANOVAs.

---

## Résultats

### Résultats comportementaux

Pour la condition d'observation dans un but de reproduction, le taux de réponses correctes lors de la phase d'exécution était de 88.2 % pour les sujets sans expérience musicale et de 98,3 % pour les pianistes professionnels.

Pour la condition d'observation dans un but de reconnaissance, le taux de bonnes réponses lors de la phase 4 s'élevait à 91.5 % pour les sujets sans expérience musicale et 99,7 % pour les pianistes professionnels.

### Index de synchronisation

Les données EEG étaient normalement distribuées. Seuls les résultats concernant les interactions conditions x groupes ont été reportés en raison de leur lien direct avec les objets de l'étude (voir Tableau 1).

Tableau 1

*Résumé des 2(conditions) x 2(groupes) MANOVAs pour chacune des quatre bandes de fréquence au sein de la zone fronto-centrale, de la zone fronto-pariétale et entre ces deux zones*

Zones	4-8 Hz		8-10 Hz		10-13 Hz		13-20 Hz		20-30 Hz	
	F	<i>p</i>	F	<i>p</i>	F	<i>p</i>	F	<i>p</i>	F	<i>p</i>
Fronto-centrale	4.823	*	2.710	0.11	6.214	**	0.081	0.78	0.468	0.50
C x G Fronto-pariétale	3.067	0.09	0.045	0.83	4.602	*	4.758	*	0.197	0.66
Fronto-centrale et Fronto-pariétale	7.867	**	0.657	0.43	6.033	**	0.816	0.38	0.071	0.79

*C, conditions; G, groupes*

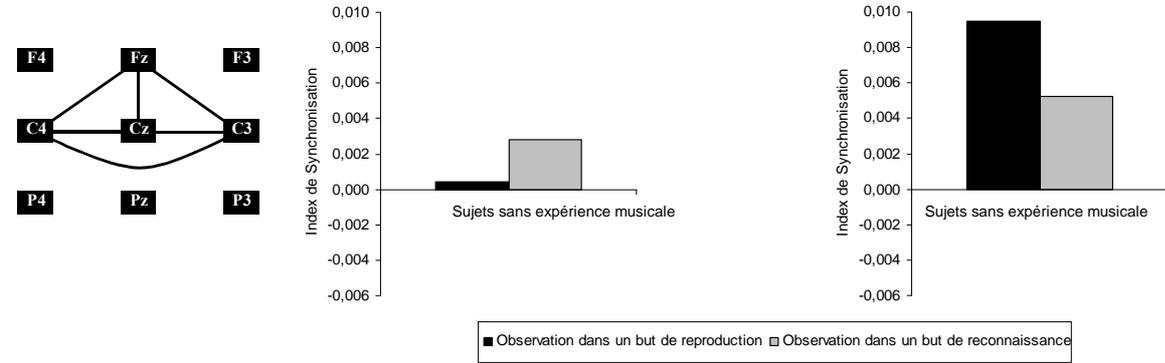
\**p* < 0.05, \*\**p* < 0.025

---

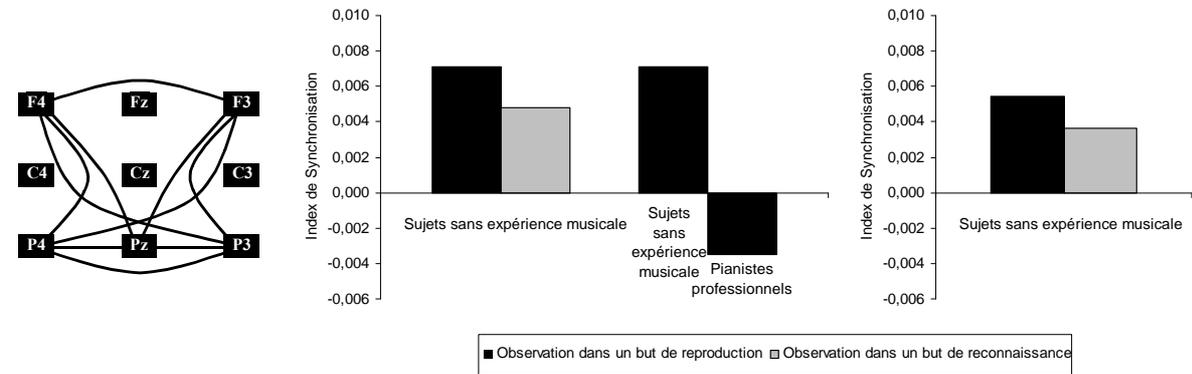
Pour la zone fronto-centrale, cinq 2 (conditions) x 2 (groupes) MANOVAs ont été effectuées. Des interactions significatives conditions x groupes ont été observées pour la phase d'observation au niveau des bandes de fréquence: (a) 4-8 Hz,  $F(1, 21) = 4.823, p < .04$ ; et (b) 10-13 Hz,  $F(1, 21) = 6.214, p < .03$  (voir Tableau 1). Les tests LSD de Fisher ont révélé des différences significatives chez les sujets sans expérience musicale entre la condition d'observation dans un but de reproduction et la condition d'observation dans un but de reconnaissance. Pour la bande de fréquence 4-8 Hz, l'augmentation de la  $SL_{finale}$  lors de la condition d'observation dans un but de reproduction était inférieure à celle relevée lors de la condition d'observation dans un but de reconnaissance. Des résultats opposés ont été mis en évidence pour la bande de fréquence 10-13 Hz (voir Figure 3).

Pour la zone fronto-pariétale, cinq 2 (conditions) x 2 (groupes) MANOVAs ont été réalisées. Des interactions significatives conditions x groupes ont été trouvées pour les bandes de fréquence: (a) 10-13 Hz,  $F(1, 21) = 4.602, p < .05$ ; et (b) 13-20 Hz,  $F(1, 21) = 4.758, p < .05$  (voir Tableau 1). Les tests LSD de Fisher ont montré des différences significatives, chez les sujets sans expérience musicale, entre la condition d'observation dans un but de reproduction et la condition d'observation dans un but de reconnaissance au niveau des bandes de fréquence 10-13 Hz et 13-20 Hz. Sous la condition d'observation dans un but de reproduction, l'augmentation de la  $SL_{finale}$  était plus importante en comparaison de celle observée sous la condition d'observation dans un but de reconnaissance. Les post-hoc ont également mis en évidence une différence significative sous la condition d'observation dans un but de reproduction, entre les sujets sans expérience musicale et les pianistes professionnels, pour la bande de fréquence 10-13 Hz (i.e., une augmentation de la  $SL_{finale}$  pour les sujets sans expérience musicale et une diminution de la  $SL_{finale}$  pour les pianistes professionnels) (voir Figure 3).

Connexions au sein de la zone fronto-centrale



Connexions au sein de la zone fronto-pariétale



Connexions entre la zone fronto-centrale et fronto-pariétale

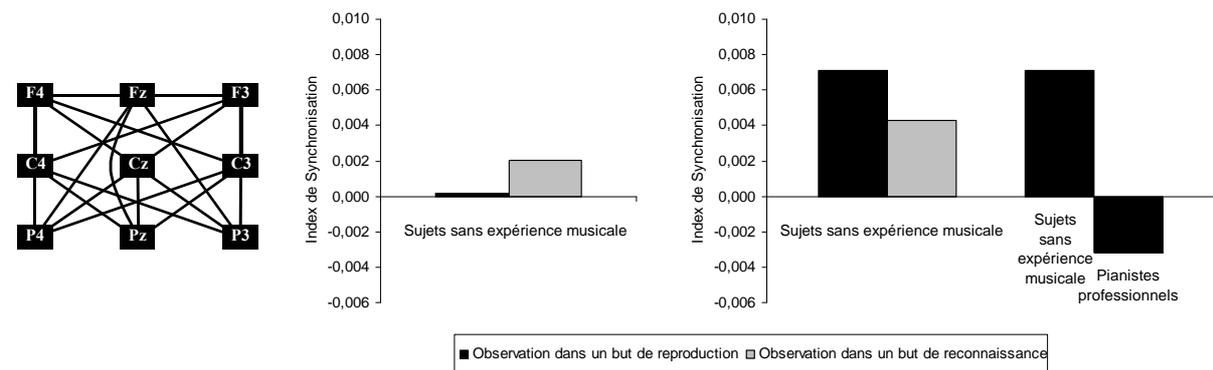


Figure 3. Résultats significatifs du test post-hoc LSD de Fisher lorsque les interactions conditions x groupes étaient significatives. Les schémas situés à droite indiquent les connexions concernées. Les graphiques affichent les différences significatives entre les sujets sans expérience musicale et les pianistes professionnels sous les deux conditions d'observation et pour les bandes de fréquence 4-8 Hz, 10-13 Hz et 13-20 Hz.

---

Concernant la connexion entre les zones fronto-centrale et fronto-pariétale, cinq 2 (conditions) x 2 (groupes) MANOVAs ont été effectuées. Des interactions significatives conditions x groupes ont été observées pour les bandes de fréquence: (a) 4-8 Hz,  $F(1, 21) = 7.867, p < .02$ ; et (b) 10-13 Hz,  $F(1, 21) = 6.033, p < .03$ . Les analyses des tests post-hoc ont mis en évidence des différences significatives chez les sujets sans expérience musicale entre la condition d'observation dans un but de reproduction et la condition d'observation dans un but de reconnaissance. Dans la bande de fréquence 4-8 Hz, l'augmentation de la  $SL_{finale}$  était supérieure sous la condition d'observation dans un but de reconnaissance comparée à la condition d'observation dans un but de reproduction, tandis que des résultats opposés ont été trouvés dans la bande de fréquence 10-13 Hz (voir Figure 3). Dans la bande de fréquence 10-13 Hz, les tests post-hoc ont également identifié une différence significative entre les sujets sans expérience musicale et les pianistes professionnels sous la condition d'observation dans un but de reproduction. Une augmentation de la  $SL_{finale}$  a été notée pour les sujets sans expérience musicale, alors qu'une diminution de la  $SL_{finale}$  a été observée pour les pianistes professionnels (voir Figure 3).

---

## Discussion

La discussion est organisée en trois sections. La première section consiste à discuter les différences entre les conditions d'observation dans un but de reproduction et de reconnaissance chez les sujets sans expérience musicale. La deuxième section considère les résultats obtenus chez les pianistes professionnels lors des conditions d'observation dans un but de reproduction et de reconnaissance chez les pianistes professionnels. La troisième section est consacrée à la comparaison des sujets sans expérience musicale et des pianistes professionnels lors de la condition d'observation dans un but de reproduction.

### **Observation dans un but de reproduction et de reconnaissance chez les sujets sans expérience musicale**

Conformément à l'hypothèse formulée, des différences significatives ont été mises en évidence au niveau de la  $SL_{finale}$ , chez les sujets sans expérience musicale, entre les conditions d'observation dans un but de reproduction et de reconnaissance: (a) dans la zone fronto-centrale pour les bandes thêta et alpha 2 (i.e., 10-13 Hz), (b) dans la zone fronto-pariétale pour les bandes alpha 2 et bêta 1 (i.e., 13-20 Hz), et (c) entre les zones fronto-centrale et fronto-pariétale pour les bandes thêta et alpha 2.

La mise en évidence de ces différences dans les bandes thêta et alpha 2 n'est pas un résultat surprenant. En effet, il est reconnu que les rythmes thêta et alpha sont liés de près aux processus de la mémoire. Plus spécifiquement, les oscillations thêta facilitent la potentialisation synaptique à long terme, qui est un mécanisme cellulaire reconnu de part son implication dans les processus d'encodage (Bliss & Collingridge, 1993). Les résultats de la présente étude sont dans la lignée de ceux émanant des travaux de Klimesch et ses collaborateurs qui ont montré que la puissance de thêta est étroitement associée au codage de nouvelles informations dans la mémoire épisodique à court terme, tandis que le rythme alpha

---

2 est important dans les processus de récupération de l'information stockée dans la mémoire à long terme. Ils ont également souligné qu'une interaction particulière entre ces deux bandes de fréquence était indicative d'un transfert d'information entre la mémoire de travail et la mémoire à long terme (Sauseng et al., 2002). Dans la présente étude, les résultats obtenus au niveau des bandes de fréquence thêta et alpha peuvent être expliqués par le paradigme expérimental utilisé. Ce paradigme présente certaines similarités avec les paradigmes traditionnels employés dans les recherches traitant de la thématique de la mémoire. Les données, utilisées dans l'analyse EEG, sont issues de la phase d'observation, qui correspond, en fait, à une phase d'encodage. Les sujets encodent l'information pour la stocker temporairement dans la mémoire de travail avant d'exécuter rapidement, soit une tâche de reconnaissance, soit une tâche de reproduction. Ce processus d'encodage implique également l'intervention de la mémoire à long terme. L'individu va y récupérer de l'information qui lui permettra d'identifier l'évènement observé, avant de stocker cet évènement dans la mémoire de travail (Magill, 2004; Shiffrin & Geisler, 1973).

De manière générale, les différences détectées lors de l'observation dans un but de reproduction et de reconnaissance corroborent le modèle de Ungleider et Mishkin (1982) qui distinguent deux voies dans le traitement des informations visuelles. La première est la voie ventrale qui est associée à l'identification perceptuelle et à la reconnaissance d'objets. La seconde est la voie dorsale qui joue un rôle critique dans la perception de l'action et plus spécifiquement dans la localisation spatiale des stimuli et le guidage visuel des actions motrices. De manière plus appliquée, ces différences corroborent les résultats de Decety et al. (1997) et Zentgraf et al. (2005). Par exemple, Decety et al. (1997) ont mis en évidence une activation du gyrus parahippocampal droit lorsque des sujets étaient invités à observer une action dans le but de la reconnaître, et ceci quel que soit la signification de l'action. Lorsque les sujets observaient une action dans le but de la reproduire ultérieurement, le cortex préfrontal dorsolatéral droit et gauche, l'aire motrice pré-supplémentaire gauche, le gyrus

---

occipital moyen gauche, le précuneus, et le cuneus droit étaient activés. Plus récemment, Zentgraf et al. (2005) ont montré des activations distinctes de la pré-AMS et de l'AMS « propre » lors de tâches d'observation de mouvements gymniques où les instructions différaient. Sous un « mode d'observation imitatif », l'AMS « propre » était fortement activée, tandis que sous un « mode d'observation évaluatif », la pré-AMS était sollicitée de manière plus importante. Cependant, les résultats de la présente étude permettent d'enrichir le corpus des connaissances pour deux raisons. Premièrement, nos résultats ont permis de détecter des différences lors de conditions d'observation distinctes au sein des zones motrices corticales, alors que Decety et al. (1997) ont identifié des différences au sein de régions plus étendues incluant, par exemple, la région temporale. Deuxièmement, pour examiner les phénomènes corticaux générés lors de l'observation dans un but de reproduction, les sujets ont été invités, après la phase d'observation, à effectuer réellement le mouvement au lieu de le simuler mentalement à la première personne comme cela a été réalisé dans l'étude de Zentgraf et al. (2005). Demander de former une image mentale peut être perçu comme un biais méthodologique, puisque aucun contrôle sur le contenu de cette image n'est possible. Bien que des scripts d'imagerie détaillés puissent préciser le contenu exact de l'image mentale, son contenu demeurera toujours obscur et non appréhendable par l'expérimentateur (Anquetil & Jeannerod, 2007; Holmes & Calmels, 2008). De plus, bien que la simulation mentale d'une action soit perçue comme un processus très voisin de celui mis en jeu lors de l'exécution d'une action motrice (Decety & Grèzes, 1999; Grèzes & Decety, 2001; Grafton et al., 1996; Jeannerod, 2001), personne, à l'heure actuelle, n'est en mesure de confirmer qu'observer une action dans le but de la reproduire génère des phénomènes corticaux similaires à ceux sollicités lors de l'observation d'une action dans le but de l'imaginer. Il importe donc que de plus amples investigations soient menées à ce sujet.

L'analyse des bandes de fréquence 10-13 Hz et 13-20 Hz a montré que l'augmentation de la  $SL_{finale}$  était plus importante lors de la condition d'observation dans un but de reproduction

---

que lors de la condition d'observation dans un but de reconnaissance, et ceci pour les sujets sans expérience musicale. Ce résultat attendu peut être expliqué par deux mécanismes distincts : la transformation visuo-motrice (Jeannerod et al., 1995; Zentgraf et al., 2005) et la transformation spatiale (Anquetil & Jeannerod, 2007). Premièrement, la transformation visuo-motrice, similaire à celle sollicitée lors de la saisie d'objets (Jeannerod et al., 1995; Stark & Zohary, 2008), était mise en jeu lors de la condition d'observation dans un but de reproduction. Un certain nombre de mécanismes neurophysiologiques permettent la transformation de ou des information(s) perceptuelle(s) prise(s) en compte lors de l'observation d'une action réalisée par autrui en commandes motrices qui guideront l'exécution de cette action. Zentgraf et al. (2005) ont suggéré que ces mécanismes ne sont pas nécessaires lorsqu'un individu observe une action dans le but de la reconnaître ultérieurement, puisque sous cette condition d'observation, aucune exécution subséquente n'est exigée. La reconnaissance d'une action pouvant être considérée comme un processus relativement éloigné de la performance motrice, observer une action dans un but de reconnaissance sera traitée comme un événement visuel (Jeannerod, 2006) et activera des structures impliquées dans l'encodage d'informations telle que la région parahippocampique (Decety et al., 1997; Grèzes et al., 1998). Le niveau élevé de synchronisation détecté lors de la condition d'observation dans un but de reproduction refléterait un recrutement supplémentaire de neurones qui permettrait la mise en jeu de la transformation visuo-motrice. Deuxièmement, la transformation spatiale (Anquetil & Jeannerod, 2007) traduirait un mécanisme au sein duquel l'observateur transposerait le corps de la personne observée selon une perspective égocentrée. Cette transposition corporelle, probablement non nécessaire lors de la condition d'observation dans un but de reconnaissance, pourrait se traduire par une augmentation de synchronisation lors de la condition d'observation dans un but de reproduction. Cependant, comme l'ont souligné Anquetil et Jeannerod (2007), les bases neurales du processus de changement de

---

perspective (i.e., changement de perspective d'un agent à un observateur) sont encore méconnues et mériteraient d'être examinées.

Dans la bande de fréquence thêta, la relation entre les valeurs de synchronisation lors de l'observation dans un but de reproduction et lors de l'observation dans un but de reconnaissance est inversée comparativement à la relation entre les valeurs obtenues pour les bandes de fréquence 10-13 Hz et 20-30 Hz. Dans les bandes alpha 2 et bêta 1, des valeurs de synchronisation plus élevées lors de l'observation dans un but de reproduction ont été mises en évidence, tandis que, dans la bande thêta, les valeurs de synchronisation les plus importantes étaient relevées lors de l'observation dans un but de reconnaissance et proches de zéro lors de l'observation dans un but de reproduction. Ces résultats sont consistants avec les travaux réalisés sur la mémoire et ayant utilisé la technique de la synchronisation/désynchronisation liée à l'évènement (i.e., SLE/DLE) (Doppelmayr et al., 1998; Klimesch, 1996, 1999; Klimesch et al., 1994, Klimesch et al., 1997a, 1997b). Des patterns oscillatoires différents et opposés dans les bandes de fréquence thêta et alpha ont été relevés lors de la présentation visuelle d'items verbaux (e.g., lettres, nombres, mots), les sujets étant invités à fournir un jugement sémantique (Klimesch et al., 1997b) ou/et à réaliser une tâche de mémoire épisodique (Klimesch et al., 1997c). Dans la présente étude, où des mouvements étaient présentés, des patterns différents de ceux identifiés par Klimesch et al. sont mis en évidence. Cette différence peut s'expliquer par l'utilisation de différents types de stimuli (séquences de mouvements *vs* items verbaux), et/ou à l'utilisation de différents types d'indicateurs EEG (SL dans la présente étude *vs* SLE/DLE dans les études conduites par Klimesch et ses collaborateurs). SL est un indicateur du couplage entre deux régions différentes du cerveau et résulte de mesures de corrélation entre deux signaux. Différentes régions du cerveau sont connectées via un processus où de larges agrégations neuronales fonctionnent de manière synchronisée (e.g., Stam & van Dijk, 2002; Varela et al., 2001). D'autre part, la synchronisation/désynchronisation liée à l'évènement, largement étudiée par

---

Pfurtscheller et ses collaborateurs (Pfurtscheller & Aranibar, 1977; Pfurtscheller & Lopes da Silva, 1999), reflète les changements de puissance rythmique dans une bande de fréquence donnée. Dans ce contexte, la synchronisation représente, à un niveau local, une augmentation de la puissance d'une activité rythmique et la désynchronisation une diminution. La DLE est un marqueur traduisant un traitement cortical actif (Pfurtscheller & Lopes da Silva, 1999), tandis que la SLE reflète un état de repos (Pfurtscheller et al., 1996) ou même un état d'inhibition corticale (Klimesch, 1996). Ces deux marqueurs décrivent différents aspects de l'activité corticale et révèlent donc différents patterns spatio-temporels (Calmels et al., sous press). Ces différentes covariations renforcent l'idée que les activités de alpha et thêta sont produites par des mécanismes différents (Andersen & Anderson, 1968; Klimesch, 1996, 1999; Steriade et al., 1990). Les oscillations corticales dans la bande alpha traduisent l'activité provenant du thalamus et transmises au cortex cérébral par les voies thalamo-corticales tandis que les oscillations dans la bande thêta reflètent une activité émanant de l'hippocampe et transmises au cortex via les voies corticales hippocampiques (Andersen & Anderson, 1968; Klimesch, 1996, 1999; Steriade et al., 1990).

### **Observation dans un but de reproduction et de reconnaissance chez les pianistes professionnels**

Conformément à notre deuxième hypothèse, les données tendent à fournir une preuve de l'existence d'une équivalence fonctionnelle entre les deux conditions d'observation chez les pianistes professionnels. L'interprétation de ces résultats doit être faite avec prudence puisque l'absence de différence significative entre les deux conditions expérimentales n'implique pas nécessairement une égalité.

L'absence de différence entre les conditions d'observation dans un but de reproduction et de reconnaissance chez les pianistes professionnels peut être expliquée par l'implication d'un réseau cortical réduit lorsque ces pianistes observent une action avec l'exigence de la

---

répliquer ultérieurement. Effectivement, à travers une pratique intensive et quotidienne, depuis une dizaine d'années ou plus, ces individus ont atteint un niveau d'expertise élevé. Cette formation musicale les a familiarisés à traiter les transformations visuo-motrices (Palmer, 1997), à apprendre en écoutant, et à observer dans le but de reproduire les actions du professeur (Haslinger et al., 2005). Lors de la condition d'observation dans un but de reproduction, il peut être ainsi supposé que le recrutement de ressources neuronales supplémentaires n'est pas nécessaire dans la mise en jeu des transformations visuo-motrices, puisque les pianistes de la présente étude sont habitués à traiter les transformations visuelles, et ce, dès leur plus jeune âge. En d'autres termes, il peut être présumé que les pianistes traitent ces transformations de manière quasi-automatique, sans effort, le coût de ces processus étant négligeable comparativement au coût mis en jeu par les sujets sans expérience musicale. Dans la première partie de la discussion relative aux sujets sans expérience musicale, il a été suggéré que la différence de synchronisation entre les deux conditions d'observation était le résultat du coût généré par un recrutement supplémentaire de neurones nécessaire pour la transformation visuo-motrice. Puisque ce coût est négligeable chez la population de pianistes, une telle différence disparaît.

L'idée qu'un haut degré d'expertise mette en jeu un processus de traitement réduit n'est pas nouvelle. La recherche menée dans le domaine de la musique a montré que les tâches sur apprises exigeaient de plus faibles ressources neuronales que des tâches nouvelles (Haslinger et al., 2004; Jancke et al., 2000; Koeneke et al., 2004; Krings et al., 2000, Meister et al., 2005). Par exemple, Krings et ses collaborateurs (2000) ont mis en évidence un pattern d'activation corticale différent au niveau du cortex moteur primaire, de l'AMS, du cortex prémoteur et du lobule pariétal supérieur, chez les pianistes comparés aux sujets sans expérience musicale et ce lors de l'exécution d'un mouvement complexe digital sur appris et réalisé avec la main droite dominante. Des régions corticales moins étendues étaient activées chez les pianistes. Des résultats similaires ont été trouvés pour des mouvements bimanuels

---

«parallèles» réalisés par des pianistes professionnels droitiers. Le cortex cingulaire antérieure, le cortex prémoteur dorsal droit, les hémisphères cérébelleux et les ganglions de la base de l'hémisphère droit étaient plus activés chez les sujets sans expérience musicale que chez les pianistes experts (Haslinger et al., 2004).

### **Observation dans un but de reproduction chez les sujets sans expérience musicale et les pianistes professionnels**

Les résultats de cette étude confirment également la troisième hypothèse. Le couplage fonctionnel lors de l'observation dans un but de reproduction est plus important chez les sujets sans expérience musicale que chez les pianistes professionnels. Ce résultat semble logique au regard des résultats précédemment mis en évidence dans cette étude. Comme suggéré par les auteurs, le couplage plus important observé chez les sujets sans expérience musicale est dû aux mécanismes relatifs à la transformation visuo-motrice/spatiale qui diffèrent selon le niveau d'expertise musicale des individus. Pour réaliser cette transformation visuo-motrice/spatiale, les sujets sans expérience musicale ont besoin de recruter une population de neurones plus importante que les pianistes professionnels. Ces points ont précédemment fait l'objet d'une analyse particulière dans la discussion. La différence observée entre ces deux populations (i.e., sujets sans expérience musicale vs pianistes) corrobore des études récentes qui ont comparé, à l'aide de l'IRMf, les activations corticales lors de sessions d'observation chez des individus dont le niveau d'expertise variait (Calvo-Merino et al., 2005, 2006; Haslinger et al., 2005). Par exemple, Calvo-Merino et al. (2005) ont enregistré des activations bilatérales plus importantes du cortex prémoteur, du sillon intrapariétal, du lobe pariétal supérieur droit, et du sillon temporal postérieur gauche chez des danseurs experts lors de l'observation passive de mouvements de danse familiers, qu'ils réalisaient quotidiennement, en comparaison à des mouvements n'appartenant à leur répertoire gestuel. Dans le domaine de la musique, Haslinger et al. (2005) ont trouvé des

---

activations plus importantes au sein du circuit fronto-pariéto-temporal chez des pianistes professionnels que chez des individus n'ayant pas d'expérience musicale. Ces différences ont été révélées d'une part lorsque ces individus observaient passivement des séquences pianistiques sans son réalisées avec la main droite et d'autre part lors de mouvements séquentiels digitaux d'opposition ou même lors de l'absence de mouvement (i.e., observation d'une main statique). Bien que la littérature ait mis en évidence une différence entre les experts et les non-experts, la comparaison avec des travaux n'ayant pas utilisé la technique de l'EEG doit être établie avec précaution. L'activation d'une région donnée, exprimée par le signal BOLD (Blood-Oxygen-Level Dependent) qui reflète les variations de la quantité d'oxygène transporté par l'hémoglobine en fonction de l'activité cérébrale, ne reflète pas les mêmes aspects de l'activité corticale que ceux du couplage fonctionnel.

Les zones où des différences de synchronisation ont été détectées entre les pianistes professionnels et les sujets sans expérience musicale, lors de l'observation dans un but de reproduction, n'est pas un résultat surprenant (voir Figure 3). Le point commun de ces zones est le cortex pariétal qui est reconnu pour son implication active dans le processus d'observation. Premièrement, il a été suggéré que le lobe pariétal inférieur soit lié aux mécanismes de la transformation visuo-motrice (Grèzes et al., 1998). Deuxièmement, le cortex pariétal semble jouer un rôle majeur dans la représentation de l'action (Bonda et al., 1996; Iacoboni et al., 1999; Sirigu et al., 1996). Par exemple, Sirigu et al. (1996) ont mis en avant le rôle important de cette région pour stocker et/ou accéder aux représentations motrices. Dans la même lignée, Iacoboni et al. (1999) ont suggéré qu'une représentation kinesthésique d'un mouvement observé était générée dans le lobe pariétal droit lors de l'observation de ce mouvement.

---

## **Conclusion**

L'utilisation de la technique non-linéaire (Montez et al., 2006; Stam & van Dijk, 2002) a permis d'analyser plus finement les mécanismes sous-tendant l'observation. Les résultats ont montré que la nature des instructions prodiguées avant l'observation et le niveau d'expertise de l'observateur généraient différentes activités rythmiques cérébrales dans les régions motrices.

---

## References

- Andersen P, Anderson SA (1968): Physiological basis of the alpha rhythm. New York: Century Crofts.
- Andres FG, Mima T, Schulman AE, Dichgans J, Hallett, Gerloff C (1999): Functional coupling of human cortical sensorimotor areas during bimanual skill acquisition. *Brain* 122:855-870.
- Anquetil T, Jeannerod M (2007): Simulated actions in the first and in the third person perspectives share common representation. *Brain Res* 1130:125-129.
- Babiloni C, Babiloni F, Carducci F, Cincotti F, Del Percio C, Vito Moretti D, Rossini PM (2002): Quantitative EEG: modeling time, space, and phase of brain oscillatory activity. In: Reisin RC, Nuwer MR, Hallett M, Medina C, editors. *Advances in clinical neurophysiology*. Amsterdam: Elsevier Science. p 284-288.
- Babiloni C, Del Percio C, Rossini PM, Marzano N, Iacoboni M, Infarinato F, Lizio R, Piazza M, Pirritano M, Berlutti G, Cibelli G, Eusebi F (accepted): Judgement of actions in experts: a high-resolution EEG study in elite athletes. *Neuroimage*.
- Bliss TVP, Collingridge GL (1993): A synaptic model of memory: long-term potentiation in the hippocampus. *Nature* 361:31-39.
- Bonda E, Petrides M, Ostry D, Evans A (1996): Specific involvement of human parietal systems and the amygdale in the perception of biological motion. *J Neurosci* 16:3737-3744.
- Calmels C, Jarry G, Stam CJ (submitted): A comparison of two linear and non-linear EEG analysis techniques. *Neurophysiologie Clinique/ Clinical Neurophysiology*.
- Calmels C, Hars M, Holmes P, Jarry G, Stam CJ (2008): Non-linear EEG synchronization during observation and execution of simple and complex sequential finger movements. *Exp Brain Res* 190:389-400.

- 
- Calmels C, Holmes P, Jarry G, Hars M, Lopez E, Paillard A, Stam CJ (2006): Variability of EEG synchronization prior to and during observation and execution of a sequential finger movement. *Hum Brain Mapp* 27:251-266.
- Calvo-Merino B, Glaser DE, Grezes J, Passingham RE, Haggard P (2005): Action observation and acquired motor skills: an fMRI study with expert dancers. *Cereb Cortex* 15:1243-1249.
- Calvo-Merino B, Grezes J, Glaser DE, Passingham RE, Haggard P (2006) Seeing or doing? Influence of visual and motor familiarity in action observation. *Curr Biol* 16:1905-1910.
- Chainay H, Krainik A, Tanguy ML, Gerardin E, Le Bihan D, Lehericy S (2004): Foot, face and hand representation in the human supplementary motor area. *Neuroreport* 15:765-769.
- Choi SH, Na DL, Kang E, Lee KM, Lee SW, Na DG (2001): Functional magnetic resonance imaging during pantomiming tool-use gestures. *Exp Brain Res* 139:311-317.
- Decety J, Grezes J (1999): Neural mechanisms subserving the perception of human actions. *Trends Cogn Sci* 3:172-178.
- Decety J, Grezes J, Costes N, Perani D, Jeannerod M, Procyk E, Grassi F, Fazio F (1997): Brain activity during observation of actions. Influence of action content and subject's strategy. *Brain* 120:1763-1777.
- Derambure P, Defebvre L, Bourriez JL, Cassim F, Guieu JD (1999): Désynchronisation et synchronisation liées à l'événement. Etude de la réactivité des rythmes électrocorticaux en relation avec la planification et l'exécution du mouvement volontaire [Event-related desynchronization and synchronization. Reactivity of cortical electroencephalographic rhythms related to planning and performance of voluntary movement]. *Neurophysiol Clin* 29:53-70.
- Di Pellegrino G, Fadiga L, Fogassi L, Gallese V, Rizzolatti G (1992): Understanding motor events: a neurophysiological study. *Exp Brain Res* 91:176-180.

- 
- Doppelmayr M, Klimesch W, Pachinger T, Ripper B (1998): Individual differences in brain dynamics: important implications for the calculation of event-related band power measures. *Biol Cybern* 79:49-57.
- Ericsson KA, Krampe RT, Tesch-Romer C (1993): The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychol Rev* 100:363-406.
- Ericsson KA, Lehmann AC (1996): Expert and exceptional performance: Evidence of maximal adaptation to task constraints. *Annu Rev Psychol* 47:273-305.
- Gerloff C, Richard J, Hadley J, Schulman AE, Honda M, Hallett M (1998): Functional coupling and regional activation of human cortical motor areas during simple, internally paced and externally paced finger movements. *Brain* 121:1513-1531.
- Grafton ST, Arbib MA, Fadiga L, Rizzolatti G (1996): Localization of grasp representations in humans by positron emission tomography. *Exp Brain Res* 112:103-111.
- Grezes J, Costes N, Decety J (1998): Top-down effect of strategy on the perception of human biological motion: a PET investigation. *Cogn Neuropsychol* 15:553-582.
- Grezes J, Decety J (2001): Functional anatomy of execution, mental simulation, observation and verb generation of actions: a meta-analysis. *Hum Brain Mapp* 12:1-19.
- Haslinger B, Erhard P, Altenmuller E, Hennenlotter A, Schwaiger M, Graf von Einsiedel H, Rummeny E, Conrad B, Ceballos-Baumann AO (2004): Reduced recruitment of motor association areas during bimanual coordination in concert pianists. *Hum Brain Mapp* 22:206-215.
- Haslinger B, Erhard P, Altenmuller E, Schroeder U, Boecker H, Ceballos-Baumann AO (2005): Transmodal sensorimotor networks during action observation in professional pianists. *J Cogn Neurosci* 17:282-293.
- Holmes P, Calmels C (2008): A neuroscientific review of imagery and observation use in sport. *J Mot Behav* 40:433-445.

- 
- Iacoboni M, Woods RP, Brass M, Bekkering H, Mazziotta JC, Rizzolatti G (1999): Cortical mechanisms of human imitation. *Science* 286:2526-2528.
- Jancke L, Shah NJ, Peters M (2000): Cortical activations in primary and sensory motor areas for complex bimanual movements in professional pianists. *Cogn Brain Res* 10:177-183
- Jasper HH (1958): Report of the committee on methods of clinical examination in electroencephalography. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 10:370-375.
- Jeannerod M (2001): Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *Neuroimage* 14:S103-S109.
- Jeannerod M (2006): *Motor cognition. What actions tell the self.* Oxford: Oxford University Press.
- Jeannerod M, Arbib MA, Rizzolatti G, Sakata H (1995): Grasping objects: the cortical mechanisms of visuomotor transformation. *Trends Neurosci* 18:314-320.
- Klimesch W (1996): Memory processes, brain oscillations and EEG synchronization. *Int J Psychophysiol* 24:61-100.
- Klimesch W (1999): EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Res Rev* 29:169-195.
- Klimesch W, Doppelmayr M, Pachinger T, Ripper B (1997b): Brain oscillations and human memory performance: EEG correlates in the upper alpha and theta bands. *Neurosci Lett* 238:9-12.
- Klimesch W, Doppelmayr M, Pachinger T, Russegger H (1997c): Event-related desynchronization in the alpha band and the processing of semantic information. *Cogn Brain Res* 6:83-94.
- Klimesch W, Doppelmayr M, Schimke H, Ripper B (1997a): Theta synchronization and alpha desynchronization in a memory task. *Psychophysiology* 34:169-176.
- Klimesch W, Schimke H, Schwaiger J (1994): Episodic and semantic memory: an analysis in the EEG-theta and alpha band. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 91:428-441.

- 
- Koeneke S, Lutz K, Wustenberg T, Jancke L (2004): Long-term training affects cerebellar processing in skilled keyboard players. *Neuroreport* 15:1279-1282.
- Krings T, Topper 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. *Neurosci Lett* 278:189-193.
- Magill RA (2004): *Motor learning and control. Concepts and applications.* New York: McGraw-Hill Companies.
- Makuuchi M (2005): Is Broca's area crucial for imitation? *Cereb Cortex* 15:563-570.
- Manganotti P, Gerloff C, Toro C, Katsuda H, Sadato N, Zhuang P, Leocani L, Hallett M (1998): Task-related coherence and task-related spectral power changes during sequential finger movements. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 109:50-62.
- Matelli M, Luppino G (2000): Parietofrontal circuits: parallel channels for sensory-motor integrations. *Adv Neurol* 84:51-61.
- Meister I, Krings T, Foltys H, Boroojerdi B, Muller M, Topper R, Thron A (2005): Effects of long-term practice and task complexity in musicians and nonmusicians performing simple and complex motor tasks: Implications for cortical motor organization. *Hum Brain Mapp* 25:345-352.
- Montez T, Linkenkaer-Hansen K, van Dijk BW, Stam CJ (2006): Synchronization likelihood with explicit time-frequency priors. *Neuroimage* 33:1117-1125.
- Muthukumaraswamy SD, Johnson BW, McNair NA (2004): Mu rhythm modulation during observation of an object-directed grasp. *Cogn Brain Res* 19:195-201.
- Oldfield RC (1971): The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia* 9:97-113.
- Palmer C (1997): Music performance. *Ann Rev Psychol* 48:115-138.
- Pfurtscheller G, Aranibar A (1977): Event-related cortical desynchronization detected by power measurement of scalp EEG. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 42:817-826.

- 
- Pfurtscheller G, Lopes da Silva FH (1999): Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles. *Clin Neurophysiol* 110:1842-1857.
- Pfurtscheller G, Stancak A, Neuper C (1996): Event-related synchronization (ERS) in the alpha band. An electrophysiological correlate of cortical idling: a review. *Int J Psychophysiol* 24:39-46.
- Rizzolatti G, Carmada R, Fogassi L, Gentilucci M, Luppino G, Matelli M (1988): Functional organization of inferior area 6 in the macaque monkey: II. Area F5 and the control of distal movements. *Exp Brain Res* 71:491-507.
- Rizzolatti G, Craighero L (2004): The mirror-neuron system. *Ann Rev Neurosci* 27:169-192.
- Rizzolatti G, Craighero L, Fadiga L (2002): The mirror system in human. In: Stamenov MI, Gallese V, editors. *Mirror neurons and the evolution of brain and language*. Philadelphia: John Benjamins Publishing Company. p 37-63.
- Rizzolatti G, Luppino G, Matelli M (1998): The organization of the cortical motor system: new concepts. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 106:283-296.
- Sauseng P, Klimesch W, Gruber W, Doppelmayr M, Stadler W, Schabus M (2002): The interplay between theta and alpha oscillations in the human electroencephalogram reflects the transfer of information between memory systems. *Neurosci Lett* 324:121-124.
- Sauseng P, Klimesch W, Schabus M, Doppelmayr M (2005): Fronto-parietal EEG coherence in theta and upper alpha reflect central executive functions of working memory. *Int J Psychophysiol* 57:97-103.
- Semlitsch H, Anderer P, Schuster P, Presslich O (1986): A solution for reliable and valid reduction of ocular artifacts, applied to the P300 ERP. *Psychophysiology* 23:695-703.
- Shiffrin RM, Geisler W (1973): Visual recognition in a theory of information processing. In: Solso RL, editor. *Contemporary Issues in Cognitive Psychology: The Loyola Symposium*. Washington: Winston. p 53-101.

- 
- Sirigu A, Duhamel J-R, Cohen L, Pillon B, Dubois B, Agid Y (1996): The mental representation of hand movements after parietal cortex damage. *Science* 273:1564-1568.
- Stam CJ, van Dijk BW (2002): Synchronization likelihood: an unbiased measure of generalized synchronization in multivariate data sets. *Physica D* 163:236-251.
- Stark A, Zohary E (2008): Parietal mapping of visuomotor transformations during human tool grasping. *Cereb Cortex* 18:2358-2368.
- Steriade M, Gloor P, Llinas RR, Lopes da Silva FH, Mesulam MM (1990): Basic mechanisms of cerebral rhythmic activities. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 76:481-508.
- Toma K, Mima T, Matsuoka T, Gerloff C, Ohnishi T, Koshy B, Andres F, Hallett M (2002): Movement rate effect on activation and functional coupling of motor cortical areas. *J Neurophysiol* 88:3377-3385.
- Ungerleider LG, Mishkin M (1982): Two cortical visual system. In: Ingle DJ, Goodale MA, Mansfield RJW, editors. *Analysis of visual behaviour* Cambridge: The MIT Press. p 549-586.
- Varela F, Lachaux JP, Rodriguez E, Martinerie J (2001): The brainweb: phase synchronization and large-scale integration. *Nat Rev Neurosci* 2:229-239.
- Zentgraf K, Stark R, Reiser M, Kunzell S, Schienle A, Kirsch P, Walter B, Vaitl D, Munzert J (2005): Differential activation of pre-SMA and SMA proper during action observation: Effects of instructions. *Neuroimage* 26:662-672.

---

**DEBRIEFING ENVOYE AUX PARTICIPANTS DE L'ETUDE INTITULEE :**

**Synchronisation EEG lors de l'Observation : Effets des Instructions et de l'Expertise**

Bonjour,

Vous avez participé à une expérimentation EEG à l'hôpital H. Mondor, il y a plus de deux ans maintenant, et les résultats sont disponibles. Comme convenu, je vous fais parvenir une synthèse de ces résultats. Un rapport, plus détaillé, en français sur cette expérimentation sera très bientôt mis en ligne sur le site de l'INSEP (<http://sciences.campus-insep.com>) et téléchargeable. Un article scientifique en langue anglaise sera également disponible dans quelques mois. Encore une fois merci de votre participation.

Claire Calmels

Claire Calmels, PhD,  
Mission Recherche, INSEP,  
11 avenue du Tremblay,  
75 012 Paris  
Tel : 01 41 74 43 73  
06 37 30 16 31

Rappel de l'expérimentation : Vous deviez observer des mouvements des doigts dans le but de les reproduire ou de les reconnaître ultérieurement. Les personnes, ayant participé à cette étude, étaient soit des sportifs de l'INSEP soit des pianistes confirmés de la région parisienne. Lors de l'observation de ces mouvements, votre activité cérébrale a été enregistrée. Cette activité a été considérée dans cinq bandes de fréquence (4-8 Hz, 8-10 Hz, 10-13 Hz, 13-20 Hz, et 20-30 Hz). Une nouvelle technique, permettant de mesurer la synchronisation neuronale et de prendre en compte la non stationnarité et la non linéarité du signal EEG, a été utilisée.

Objet d'étude et Hypothèse(s) : L'objet principal de la présente étude était d'examiner les activités neuronales détectées dans les zones motrices corticales durant l'observation de ces mouvements (voir Figure ci-dessous). Nous avons fait l'hypothèse que les pianistes, experts dans l'exécution de mouvements digitaux, génèreraient une activité neuronale moins importante que celle des sportifs quelle que soit la condition d'observation considérée.

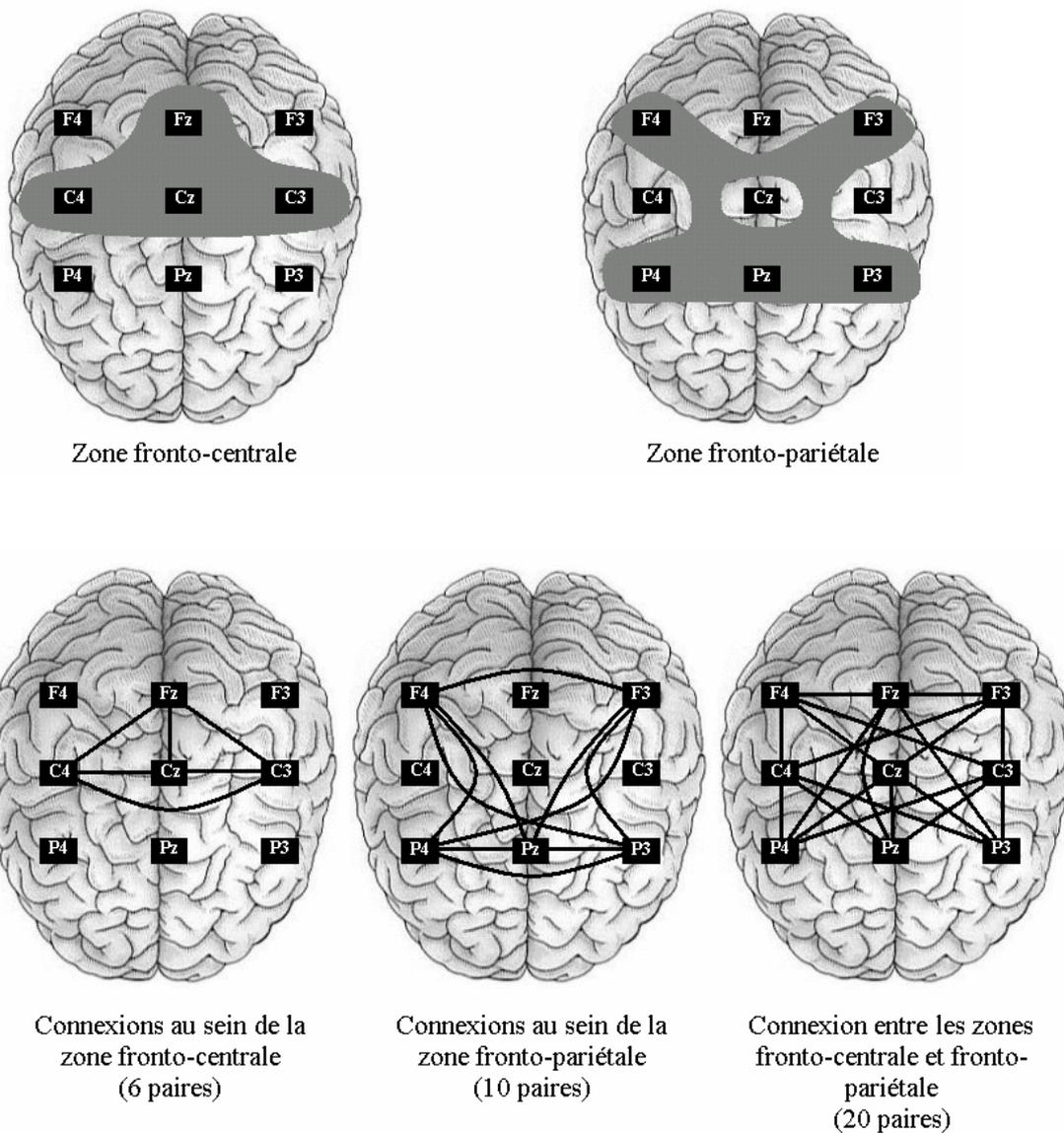


Figure. Le haut de la figure représente les deux zones considérées (i.e., zone fronto-centrale et zone fronto-pariétale). Le bas de la figure indique les connexions au sein de chaque zone et entre ces deux zones.

Résultats et interprétation : Nos hypothèses ont été partiellement vérifiées. Principalement, nous avons mis en évidence, chez les sportifs et dans la bande de fréquence 10-13 Hz, des valeurs de synchronisation beaucoup plus importantes lors de l'observation dans le but de

---

reproduire l'action observée que lors de l'observation dans le but de reconnaître cette action. De même, une différence notable a été décelée, lors de l'observation dans un but de reproduction, entre les sportifs et les pianistes. Les valeurs de synchronisation chez les sportifs étaient très nettement supérieures à celles relevées chez les pianistes. La principale explication est le mécanisme de transformation visuomotrice mis en jeu lors de la condition d'observation dans un but de reproduction. Ce mécanisme de transformation de stimuli visuels en output moteurs ne semblerait pas sollicité : (i) lors de l'observation dans un but de reconnaissance chez l'ensemble des sujets, et (ii) lors de l'observation dans un but de reproduction chez les pianistes. Ces derniers, de part leurs années de pratique musicale au cours desquelles ils ont acquis une dextérité manuelle remarquable, n'éprouveraient pas le besoin de recruter des ressources neuronales supplémentaires permettant la mise en jeu de ce mécanisme.

Conclusion : Cette étude aura permis d'enrichir le corpus de connaissances sur les processus d'observation et d'imitation d'actions motrices.

---

**2<sup>ème</sup> étude :**

**MECANISMES EEG IMPLIQUES LORS DE LA  
MEMORISATION DE MOUVEMENTS :  
EFFETS DES INSTRUCTIONS ET DE L'EXPERTISE**

Calmels, C., Foutren, M., & Stam, C.J. (in revision). Non-linear EEG synchronization during a working memory task: Effects instructions and expertise. *International Journal of Psychophysiology*.

---

## INTRODUCTION

Les êtres humains passent, de façon quotidienne, un temps important à observer les autres dans le but de les imiter, de les comprendre, de communiquer, de partager des émotions, et d'interagir avec eux (Decety et al., 2002). Par exemple, lors de l'entraînement, les sportifs de haut niveau visionnent des vidéos de leurs performances précédentes pour analyser leurs erreurs et améliorer leurs gestes (Calmels et al., 2006).

### *Observation*

L'observation est donc un processus important et de nombreuses études se sont attachées à étudier ce processus (Babiloni et al., in press ; Calvo-Merino et al., 2005, 2006 ; Iacoboni et al., 2005 ; Zentgraf et al., 2005). Quelques unes ont examiné les mécanismes cérébraux lors de l'observation d'actions dans le but de les reproduire et de les reconnaître ultérieurement (Decety et al., 1997 ; Grèzes et al., 1998 ; Zentgraf et al., 2005, Calmels et al., 2006). Par exemple, Decety et al. (1997) ont montré que lors de l'observation d'actions digitales, des circuits corticaux différents étaient sollicités en fonction de l'instruction donnée préalablement : observer dans le but de reproduire l'action ou observer dans le but de reconnaître l'action. Le cortex préfrontal dorsolatéral et l'aire motrice supplémentaire (SMA) étaient stimulés dans le premier cas ; le gyrus droit parahippocampique était activé dans le second cas. Zentgraf et al. (2005), lors de l'observation de mouvements gymniques impliquant le corps entier, parviennent à la même conclusion. La nature des instructions influence donc les zones corticales mises en jeu. Très récemment, Calmels et al. (2006), via l'électroencéphalographie (EEG), ont mis en évidence, dans la bande de fréquence 10-13 Hz, des oscillations électro-corticales différentes chez les individus non experts lors de conditions d'observation de mouvements digitaux dans le but de les reproduire ou de les reconnaître

---

ultérieurement. Les zones motrices corticales étaient plus synchronisées lors de la condition d'observation dans un but de reproduction. De même, lors de cette condition, ces mêmes zones étaient synchronisées de manière plus importante chez les sujets sans expérience musicale que chez les pianistes professionnels.

### *Rétention*

D'autres études se sont également intéressées aux processus neuronaux mis en jeu lors de la phase de rétention (Hwang et al., 2005 ; Sauseng et al., 2005 ; Sarnthein et al., 1998 ; Stam et al., 2002 ; Tallon-Baudry et al., 1998, 1999 ). Ces études, via des techniques d'EEG, ont utilisé deux types de tâches : des tâches de reproduction ou de rappel (Sarnthein et al., 1998 ; Stam et al. 2002) et des tâches de reconnaissance (Hwang et al., 2005 ; Sauseng et al., 2005 ; Tallon-Baudry et al., 1998, 1999). De façon générale, des stimuli de nature visuelle (i.e, des lettres, des nombres, des mots, des matrices contenant des cibles, des localisations spatiales) étaient présentés aux sujets. Ceux-ci devaient les retenir afin de les rappeler ou de les reconnaître ultérieurement.

#### Tâches de reproduction ou de rappel

Sarnthein et al. (1998) ont invité des sujets à observer, pendant six secondes, une chaîne de caractères (e.g., %H54L9) et des lignes (e.g. ^^) afin de reproduire ces stimuli visuels ultérieurement. Une phase de rétention de quatre secondes séparait la phase d'observation de la tâche de rappel. Ces auteurs ont mis en évidence, pour ces deux types de stimuli, lors de la phase de rétention, une augmentation des valeurs de cohérence entre les électrodes des zones préfrontales et postérieures associatives pour les bandes de fréquence thêta (4-7 Hz) ; la cohérence étant une mesure qui détermine le degré de relation linéaire entre deux électrodes.

---

Plus récemment, Stam et al. (2002) ont examiné les oscillations électro corticales générées lors de la phase de rétention. Ils ont soumis des personnes âgées de plus de 60 ans à deux types de tâches. Le premier type de tâche (i.e., condition contrôle) consistait à inviter les sujets à fermer les yeux et à ne rien faire. Le deuxième type de tâche conviait les participants à observer des images en noir et blanc pendant une durée de dix secondes puis à les rappeler une minute plus tard. Lors de cette tâche de rappel, les sujets avaient les yeux fermés. Les données analysées concernaient les seize premières secondes de la phase de rétention. Les résultats ont montré une synchronisation dans la bande de fréquence thêta (2-6 Hz) plus élevée que celle détectée lors de la condition contrôle. Parallèlement une désynchronisation dans les bandes de fréquence alpha inférieure (6-10 Hz), bêta inférieure (14-18 Hz) et bêta supérieure (18-22 Hz) a été décelée.

#### Tâches de reconnaissance

Tallon-Baudry et al. (1998) ont mis en évidence, dans la bande de fréquence 20-80 Hz et plus particulièrement dans la zone 20-30 Hz, lors de la phase de rétention, une activité soutenue au niveau des électrodes situées dans les régions occipito-temporale et frontale. Ces auteurs ont suggéré que cette activité pouvait traduire un mécanisme de répétition permettant de retenir le stimulus présenté afin d'être capable de le reconnaître ultérieurement.

Plus récemment, Sauseng et al. (2005) ont examiné les oscillations alpha lors de tâches impliquant la mémoire de travail. Les participants ont été soumis à deux types de tâche : la première où ils devaient mémoriser une matrice contenant des cibles présentées pendant 500 ms (i.e., condition de rétention) et la seconde où ils devaient, avant de mémoriser la matrice, procéder à une rotation mentale de 90° (i.e., condition de manipulation). Suite à cette phase de mémorisation, ils étaient soumis à une tâche de reconnaissance. Les résultats ont principalement mis en évidence, au début de la phase de mémorisation, une différence entre la condition de rétention et la condition de manipulation. Dans la bande de fréquence alpha, une synchronisation au niveau local (ERS, Event Related Synchronization) plus importante au

---

niveau des sites préfrontaux lors de la condition de manipulation a été relevée par rapport à la synchronisation générée lors de la condition de rétention. De même, une désynchronisation locale (ERD, Event Related Desynchronization) plus importante au niveau des sites occipitaux a été décelée lors de la condition de manipulation. Pendant la fin de la phase de mémorisation, aucune différence entre les deux conditions expérimentales n'est apparue.

Dans le même ordre d'idées, Hwang et al. (2005) ont examiné les activités oscillatoires suite à la présentation de stimuli qui devaient être reconnus ultérieurement. Ces stimuli étaient soit visuels et verbalisables (i.e., lettres, mots, objets) soit visuels et non verbalisables (i.e., localisations spatiales et quadrillages diffus). Pendant la phase de mémorisation ou de rétention, l'utilisation de la répétition verbale était aisée lorsqu'il s'agissait de retenir des stimuli verbalisables et impossible lorsqu'il était question de stimuli non verbalisables. Les auteurs ont mis en évidence que se souvenir de stimuli facilement verbalisables généraient plus de puissance au niveau des zones frontale et occipitale comparé à la puissance produite lors de la phase de présentation de ces stimuli. Ce résultat, observé uniquement dans la bande de fréquence 14-28 Hz, laisserait penser que la répétition verbale serait liée à cette bande de fréquence.

Il est également à noter que dans toutes les études mentionnées précédemment, les stimuli utilisés étaient des images statiques (e.g., des lettres, des doigts, des mots, des formes homogènes, des dessins, des cibles colorées, des localisations spatiales). A notre connaissance, des démonstrations dynamiques, comme des mouvements biologiques, n'ont jamais fait l'objet d'expériences. Plus précisément, aucune étude n'a investigué les oscillations corticales mises en jeu lorsqu'un individu devait retenir, pendant une courte période, dans sa mémoire un mouvement dans le but de le reproduire ou de le reconnaître ultérieurement. Une attention sur ce point pourrait justifier un futur objet de recherche.

Dans la littérature, peu de recherches ont examiné les mécanismes EEG, lors d'une tâche impliquant la mémoire de travail, chez des experts et des novices. Les experts se définissent comme des individus possédant un niveau de performance très élevé dans un domaine particulier. Cette expertise a été obtenue par une pratique longue et intense (Ericsson et al., 1993). La littérature a mis en évidence d'une part que les experts possédaient une capacité de stockage de la mémoire de travail plus importante que les non experts. Starke et al. (1987) ont montré que des danseurs experts obtenaient des scores plus élevés dans des tâches de reproduction comparé à des novices et Millslage et al. (2002) ont rapporté des résultats similaires sur une tâche de reconnaissance avec des basketteurs. D'autre part, la littérature a établi que les experts comparés aux novices possédaient une architecture corticale qui différait structurellement et fonctionnellement (Karni, 1996). Par exemple, il a été démontré qu'une pratique pianistique longue et régulière entraînait des changements corticaux (Amunts et al., 1997 ; Gaser et Schlaug, 2003 ; Koeneke et al., 2004). Chez les pianistes professionnels, une augmentation du volume de la matière grise au niveau du réseau moteur cortical, comprenant les aires motrices primaires, le cortex prémoteur, les aires somatosensorielles et le cervelet gauche, a été détectée (Gaser et Schlaug, 2003). Chez des musiciens experts en instruments à claviers, une augmentation de la taille des aires du cortex moteur a été révélée (Amunts et al., 1997). Koeneke et al. (2004) ont également établi qu'un recrutement neuronal plus faible était mis en jeu chez les pianistes expérimentés que chez des personnes n'ayant aucune expérience musicale et ceci lors de la réalisation de tâches unimanuelles et bimanuelles.

L'influence de l'expertise sur les mécanismes corticaux lors de la réalisation mettant en jeu la mémoire de travail mériterait d'être investiguée.

---

## OBJET D'ETUDE

Le but de la présente étude a été d'examiner les mécanismes corticaux mis en jeu chez des sujets ne possédant aucune expérience musicale et chez des pianistes professionnels lorsqu'ils devaient maintenir dans leur mémoire, pendant quelques secondes, des mouvements qu'ils devaient ultérieurement reproduire ou reconnaître. La technique de l'EEG a été retenue car elle permet d'appréhender les activités cérébrales avec une excellente résolution temporelle. Les experts ont été sélectionnés parmi une population de pianistes professionnels, population reconnue pour son expertise dans la dextérité manuelle. Les non experts ou encore les novices étaient des individus ne possédant aucune expérience musicale et n'exerçant pas la profession de secrétaire. Le signal EEG a été analysé avec la technique de l'index de synchronisation (IS), une technique mise au point par le professeur Stam. Cette technique permet d'examiner la connectivité fonctionnelle et de déceler les changements linéaires et non linéaires de l'activité corticale (Montez et al., 2006 ; Stam et Van Dijk, 2002).

L'approche à la première personne de Varela et al. (1999) a été utilisée afin de mettre en correspondance des données qualitatives, et plus particulièrement les stratégies de rétention utilisées par les sujets, avec des données quantitatives relevées lors de l'acquisition EEG.

## HYPOTHESES

Trois hypothèses ont été testées.

Premièrement, le but de l'observation (i.e., condition de reproduction et condition de reconnaissance) influence la nature des oscillations électro corticales lors de la phase de rétention. La connectivité fonctionnelle chez les sujets sans expérience musicale serait plus

---

importante lors de la condition de reproduction que lors de la condition de reconnaissance. Lors de la première condition, le processus de rétention mettrait en jeu divers facteurs comme la préparation de la réponse ou/et la transformation visuo-motrice qui ne seraient pas nécessaires lors de la condition de reconnaissance. En effet, Passingham et Sakai (2004) ont montré que l'activité soutenue, se produisant dans le cortex préfrontal et détectée lors de la phase de rétention, refléterait différents facteurs tels que le maintien de l'information sensorielle, la transformation visuo-motrice, la préparation de la réponse ou encore l'attente de récompenses. Ces facteurs reconnus comme nécessitant des activations neuronales supplémentaires, notamment au niveau du cortex préfrontal dorsolatéral (e.g., Pochon et al., 2001), pourraient expliquer la connectivité fonctionnelle plus importante générée lors de la condition de reproduction.

Deuxièmement, chez les pianistes professionnels, une différence entre ces deux conditions ne serait pas attendue, ces sujets étant familiarisés avec le processus de transformation visuo-motrice de part la pratique musicale longue, quotidienne, et intense à laquelle ils ont été soumis au cours de leur enfance.

Troisièmement, et en conséquence des deux hypothèses précédentes, une connectivité fonctionnelle plus importante serait observée chez les sujets ne possédant aucune expérience musicale comparé aux pianistes professionnels lorsque l'instruction était d'observer le mouvement dans un but de reproduction.

---

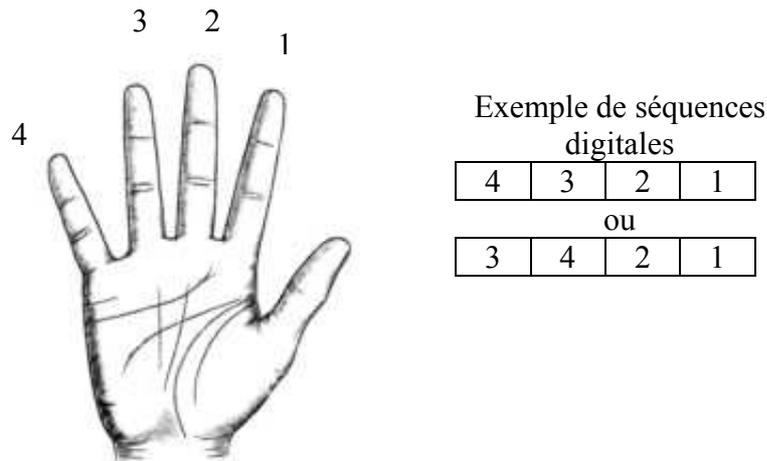
## METHODOLOGIE

### *Sujets*

Onze pianistes professionnels (huit hommes et trois femmes;  $M = 26.63$ ,  $SD = 4.99$ ) et douze sujets ne possédant aucune expérience musicale (huit hommes et quatre femmes;  $M = 24.79$ ,  $SD=3.61$ ) ont pris part à l'étude de manière volontaire après avoir rempli un formulaire de consentement (Voir Annexe 3). Les pianistes professionnels possédaient au minimum dix années d'expérience. Tous les sujets étaient droitiers (inventaire d'Oldfield, 1971) (Voir Annexe 2) et ne présentaient aucun antécédent neurologique ou psychiatrique. Ils étaient également naïfs quant aux objectifs de l'étude.

### *Tâches expérimentales*

Les tâches étaient des tâches motrices séquentielles de mouvements digitaux. Le mouvement consistait à toucher avec l'extrémité du pouce droit, le bout des autres doigts de la main droite, qui était posée sur un oreiller en position supinoire (voir Figure 1). La tâche se composait de quatre contacts des doigts réalisés à une fréquence de 2 Hz. Quarante séquences de mouvements distincts ont été utilisés. Les contacts digitaux ont été choisis au hasard et le pouce ne pouvait toucher deux fois de suite le même doigt (e.g, 4321, 3421...); 1 représentant l'index, 2 le majeur, 3 l'annulaire, et 4 l'auriculaire (voir Figure 1). Ces mouvements ont été choisis, car étant de faible amplitude et étant réalisés loin des électrodes situées sur le scalp, ils permettaient ainsi d'éviter l'apparition d'artéfacts mécanographiques sur le tracé EEG (Derambure et al., 1999).



*Figure 1. Tâche expérimentale.*

### *Procédure expérimentale*

La procédure expérimentale s'est composée de deux étapes. La première étape était l'acquisition des données via l'EEG et la deuxième étape était la réalisation d'entretiens d'explicitations (Vermersch, 2003).

#### Première étape : acquisition des données EEG

Lors de la première étape, les sujets ont été testés individuellement et ont été soumis à trois conditions différentes au cours desquelles un enregistrement EEG a été effectué : (a) une condition de reproduction, (b) une condition de reconnaissance, et (c) une condition contrôle. Pendant l'enregistrement, les sujets ont été invités à adopter une posture relâchée. Ils étaient assis confortablement dans un fauteuil dans une pièce obscure, les avant-bras posés sur les accoudoirs. De plus, afin de réduire les artéfacts musculaires et oculaires EEG, il a été demandé aux individus de fixer leur attention sur un point placé sur l'écran situé à 1m30, de garder leur mâchoire relâchée, de ne pas faire de mouvements hormis ceux requis pour l'expérimentation et d'éviter de cligner des yeux.

---

Condition de reproduction. Chaque sujet a observé 40 séquences de mouvements digitaux dans le but de les reproduire. Chaque séquence a été intégrée dans un ensemble composé de cinq phases qui ont constitué un essai. Lors de la phase 1, d'une durée de 4 secondes, le sujet regardait un écran bleu. Deux secondes après le début de cette phase, l'instruction « FAIRE » apparaissait à l'écran et invitait le sujet à observer l'action dans le but de la reproduire ultérieurement. Lors de la phase 2, phase d'observation, le sujet observait une vidéo au cours de laquelle la main d'une tierce personne réalisait une séquence de mouvements digitaux. Cette phase s'est vue attribué une durée de 3.24 secondes car deux périodes de 505 ms ont été ajoutées avant et après l'exécution de l'action. Ces périodes ont été incluses afin de permettre au sujet de s'appropriier le contexte et d'éviter les changements d'image vidéo trop brusques. La consigne donnée au sujet était d'observer le mouvement dans le but de le reproduire ultérieurement. Durant la phase 3, d'une durée de 3.76 secondes, un fond orange indiquait au sujet de rester concentré. Pendant la phase 4 d'une durée de 3.24 secondes, un écran noir invitait le sujet à reproduire la séquence de mouvement digitaux qu'il venait d'observer lors de la phase 2. Lors de cette phase, l'expérimentateur vérifiait la reproduction correcte de chaque mouvement. Les essais ratés n'ont pas été pris en compte. Un essai réussi était un essai au cours duquel le mouvement a été reproduit correctement, et inversement pour un essai raté. Enfin, lors de la phase 5, d'une durée de 6 secondes, un fond rouge indiquait au sujet qu'il pouvait se relâcher, cligner les yeux, et ne penser à rien. L'intervalle de temps entre le début de l'observation de la vidéo de l'action et la vidéo suivante était donc de 20.24 secondes (voir Figure 2).

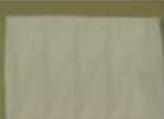
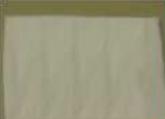
Phases	Phase 1	Phase 2 (observation)	Phase 3	Phase 4 (observation ou exécution)	Phase 5 (repos)
Durée des phases	4 s	3.24 s	3.76 s	3.24 s	6 s
Condition d'observation dans un but de reproduction	<b>FAIRE</b>				
Condition d'observation dans un but de reconnaissance	<b>RECONNAITRE</b>				<b>REPONDRE</b>
Condition contrôle					

Figure 2. Déroulement temporel d'un essai dans les trois conditions (i.e., condition d'observation dans un but de reproduction, condition d'observation dans un but de reconnaissance, et condition contrôle).

Condition de reconnaissance. Lors de cette condition, les 40 essais suivaient un protocole similaire au précédent. Cependant, lors de la phase 1, l'instruction « RECONNAITRE » apparaissait sur l'écran bleu au bout de 2 secondes et invitait le sujet à observer l'action dans le but de la reconnaître dans une phase ultérieure. La phase 4 était également différente. Une nouvelle vidéo était présentée au sujet. Elle pouvait être identique ou différente de celle observée lors de la phase 2. 50% des vidéos étaient identiques. Puis, lors de la phase 5, un fond rouge apparaissait avec l'instruction « REPONDRE. » Le sujet serrait son poing si la deuxième vidéo était différente de la première. S'il s'agissait de la même vidéo, le sujet devait ne rien faire. Seules les réponses correctes ont été retenues dans l'analyse.

Condition contrôle. Lors de la condition contrôle, la procédure était similaire à celle décrite lors des conditions précédentes mise à part que lors des phases 2 et 4, le sujet observait un objet statique (i.e., un oreiller).

---

Un trigger ou déclencheur a été inséré lors de chaque essai. Il a permis de signaler les changements de couleur de l'écran, via une photodiode PIN (i.e., composant semi-conducteur ayant la capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique) en mode photovoltaïque.

Quatre blocs de 10 minutes comprenant 30 essais étaient réalisés pour chaque sujet. Une période de repos de 5 minutes a été octroyée entre chaque bloc. L'ordre des 120 essais a été randomisé. Pendant toutes les phases, excepté celles de reproduction et de réponse, l'expérimentateur a vérifié que les doigts du sujet ne bougeaient pas.

#### Deuxième étape : entretiens d'explicitation

Lors de la deuxième partie de la procédure, des entretiens d'explicitations (Vermesch, 2003) ont été menés afin de mettre en évidence les stratégies utilisées par les 23 sujets lors de la phase d'observation et de rétention (phase 2 et 3). Ceci a permis de coupler une approche à la première personne et une approche à la troisième personne (Varela et al., 1999) et d'appréhender finement l'expérience consciente des sujets.

#### *Enregistrement EEG*

L'activité électrique cérébrale a été enregistrée à partir de 19 électrodes positionnées sur le scalp selon un montage mono polaire matriciel inspiré du système international 10-20 (Jasper, 1958) : Fp1, Fp2, FZ, F7, F8, F3, F4, CZ, C3, C4, PZ, P3, P4, T3, T4, T5, T6, O1, O2. Deux électrodes de référence, placées sur les mastoïdes droites et gauche du participant (i.e., M1, M2) et deux électrodes de terre qui ont été positionnées sur le front (i.e., G1, G2) ont été utilisées. L'activité électrique propre au mouvement verticaux (VOEG) et horizontaux (HOEG) des yeux a été également enregistré afin d'éliminer, hors enregistrement, les essais contaminés par des artefacts. Pour la détection des mouvements horizontaux des yeux, une paire d'électrodes a donc été placée près du cantus externe de chaque œil (placement

---

binoculaire) et pour l'enregistrement des mouvements oculaires verticaux, deux électrodes ont été fixées au-dessus et en dessous de l'œil droit (placement monoculaire). Les impédances des électrodes étaient inférieures à 5 KOhms. elles ont été vérifiées au début de chaque bloc de l'expérimentation. L'amplificateur EEG était un amplificateur de marque Deltamed. La bande passante était de 0.15 à 114 Hz et était échantillonnée à la fréquence de 256 Hz.

### *Index de synchronisation (IS)*

L'index de synchronisation (IS) est une mesure qui exprime la synchronisation générale entre deux séries temporelles. L'IS prend en considération les caractéristiques du signal EEG (i.e., non linéarité et non stationnarité). Dans la présente étude, il a décrit l'interdépendance d'une électrode particulière avec l'ensemble des 18 électrodes constituant le montage. En d'autres termes, l'IS a traduit la synchronisation d'une électrode particulière avec les autres électrodes. Les valeurs d'IS s'échelonnent dans une fourchette allant de 0 à 1 (1 correspond à une synchronisation maximale, 0 à une absence de synchronisation).

### *Traitement des données*

Les données EEG ont été analysées dans les bandes de fréquence 4-8 Hz, 8-10 Hz, 10-13 Hz, 13-20 Hz, et 20-30 Hz. Afin de mieux saisir les variations des oscillations corticales, la phase 3 (i.e., phase de rétention) a été divisée en trois sous périodes de 1.254 seconde.

Le traitement des données s'est composé de trois phases : (a) la segmentation des blocs, (b) la correction des artéfacts, et (c) le calcul de l'IS.

---

### Segmentation des blocs

40 essais ont été réalisés pour chacune des trois conditions (voir Figure 2). Chaque essai s'est composé de cinq phases. Seule la phase de rétention a été prise en compte dans l'analyse de la présente étude.

### Correction des artéfacts

Une inspection off-line des différentes phases des essais a été réalisée pour repérer les artéfacts oculaires qui ont été corrigés par la méthode de Semlitsch, Anderer, Schuster, et Presslich (1986). Le principe de cette méthode est de soustraire une fraction de l'électro-oculogramme (EOG) des tracés EEG. Plus spécifiquement, une analyse de régression associée à un moyennage des artéfacts a été effectuée. Cette opération a été réalisée avec le logiciel Neuroscan 4.3. Les paramètres suivants ont été sélectionnés: trigger: positive direction, threshold: 20%, blink values: 2 minimum sweeps, average artifact duration: 400ms, and VEOG as the channel used in this computation; review: maxima and blinks enabled; and output: LDR + CNT.

### Calcul des IS

L'IS été calculé pour chacun des 40 essais des trois conditions, pour chacun des 23 sujets, pour chacune des 19 électrodes, pour chacune des cinq bandes de fréquence, et ce pour chacune des trois sous périodes de la phase de rétention. Les 40 valeurs de l'index de synchronisation obtenues pour chaque sous période ont été moyennées, et ce pour chaque sujet, chaque électrode, chaque condition, et pour chaque bande de fréquence.

Afin de diminuer la variabilité entre les sujets, la valeur IS relevée lors de la phase 3 sous la condition contrôle a été soustraite de la valeur IS sous la condition d'observation (i.e., IS condition d'observation – IS condition contrôle) pour obtenir une valeur finale IS ( $IS_{final}$ ). Cette valeur était soit positive et traduisait une augmentation de l'IS, soit négative et reflétait

une diminution de l'IS. Cette opération, couramment utilisée dans la littérature, a été par exemple réalisée par Manganotti et al. (1998) ou encore Gerloff et al. (1998).

Pour accroître la puissance statistique, les valeurs des IS pour les électrodes O2-O1 ont été ensuite moyennées et une valeur de synchronisation pour la région occipitale a été obtenue. La même procédure a été appliquée pour P4-PZ-P3, F8-F4-FZ-F3-F7, T6-T4, et T5-T3. Six régions ont donc été déterminées : la région occipitale (O1-O2), la région pariétale (P4-PZ-P3), la région centrale (C4-CZ-C3), la région frontale (F8-F4-FZ-F3-F7), la région temporale droite (T6-T4), et la région temporale gauche (T5-T3) (voir Figure 3).

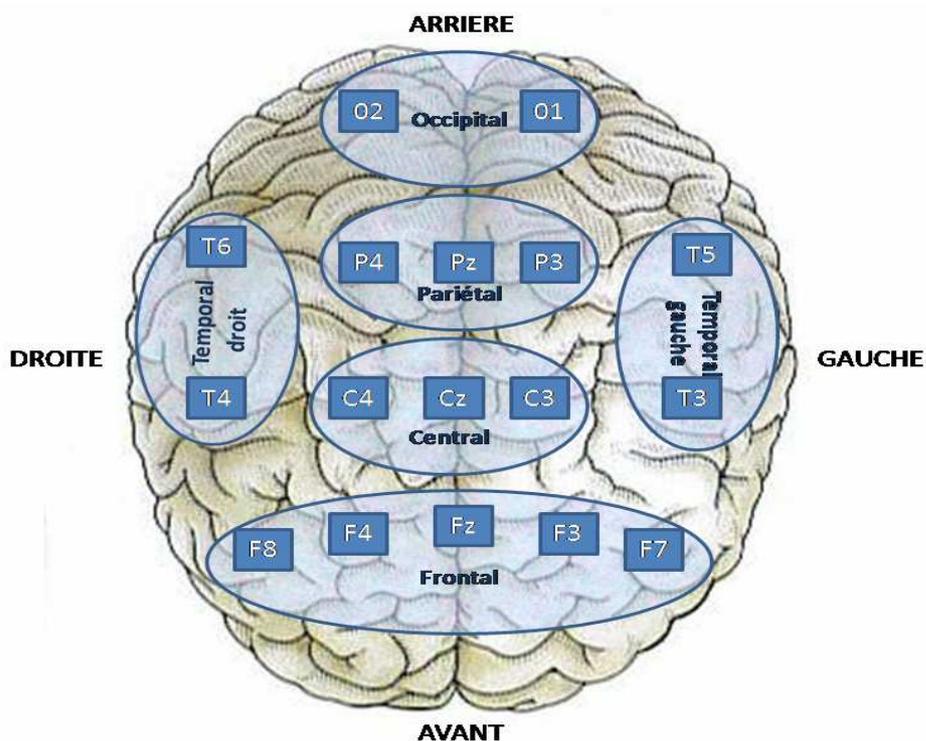


Figure 3. Les six régions d'intérêt.

---

## *Analyses statistiques*

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel statistica software 7.

Pour chacune des bandes de fréquence, des 3 (Période) x 2 (Condition) x 6 (Zone) x 2 (Sujet) MANOVAs ont été effectuées. Les trois premiers facteurs étaient des facteurs intra-groupes (période, trois niveaux : première période, deuxième période, troisième période ; condition, deux niveaux : observation dans le but de reproduction, observation dans le but de reconnaissance ; zone, six niveaux : occipitale, pariétale, centrale, frontale, temporale droit, temporale gauche). Le dernier facteur était un facteur intergroupe (sujet, deux niveaux : pianistes professionnels, sujets sans expérience musicale). Des tests post hoc (Fisher LSD) ont été réalisés lorsque les résultats des MANOVAs étaient significatifs. La normalité de la distribution des données a été réalisée à l'aide du test de Kolmogorov Smirnov et ce avant la réalisation des MANOVAs. Les interactions Période x Condition x Sujet, Condition x Zone x Sujet, Période x Condition x Zone, et Période x Condition x Zone x Sujet ont été examinées car elles étaient directement liées à l'objet de l'étude.

---

## RESULTATS

### *Résultats qualitatifs*

Quatre stratégies de mémorisation ont été identifiées comme étant utilisées par les sujets pendant la phase de rétention. La première était la répétition visuelle ou l'imagerie mentale; elle était utilisée par quatre sujets sans expérience musicale. La deuxième, la répétition vocale, était employée par deux sujets sans expérience musicale et deux pianistes professionnels. La troisième était l'association entre la répétition vocale et la répétition visuelle. Cette stratégie associative a été utilisée par six sujets sans expérience musicale et deux pianistes professionnels. Enfin, sept pianistes professionnels n'utilisaient aucune stratégie de mémorisation. Seules les données des six sujets sans expérience musicale et des deux pianistes professionnels ont été incluses dans cette étude. Ce choix a été fait pour permettre de comparer des objets, des stratégies similaires ce qui explique l'exclusion de quinze sujets.

### *Résultats quantitatifs*

Les données EEG étaient normalement distribuées. Aucun effet significatif pour les interactions Période x Condition x Sujet, Période x Condition x Zone, et Période x Condition x Zone x Sujet n'a été mis en évidence pour les cinq bandes de fréquence (voir Tableau 1).

		4-8 Hz		8-10 Hz		10-13 Hz		13-20 Hz		20-30 Hz	
		F	<i>p</i>	F	<i>p</i>	F	<i>p</i>	F	<i>p</i>	F	<i>p</i>
Période	x	0.424	.66	0.360	.70	0.036	.96	0.052	.95	1.353	.29
Condition	x										
Sujet											
Condition	x	1.057	.40	0.700	.63	0.927	.48	1.001	.43	3.448	*
Zone	x										
Sujet											
Période	x	0.445	.92	0.836	.60	0.728	.69	0.404	.94	0.753	.67
Condition	x										
Zone											
Période	x	1.466	.17	0.888	.55	0.675	.74	1.449	.18	0.339	.97
Condition	x										
Zone	x										
Sujet											

Tableau 1. Résumé des 3 (Période) x 2 (Condition) x 6 (Zone) x 2 (Sujet) MANOVAs pour chacune des bandes de fréquence lors de la phase de rétention

\*  $p < .015$

Seule l'interaction Condition x Zone x Sujet était significative pour la bande de fréquence 20-30 Hz :  $F(5, 30) = 3.448, p < .05$ .

Des post hoc (Fisher LSD) ont été réalisés et trois types de résultats ont été trouvés.

Premièrement, pendant la phase de rétention et pour les sujets sans expérience musicale, des différences significatives de synchronisation entre la condition de reconnaissance et la condition de reproduction ont été trouvées pour les zones pariétale, centrale, frontale, temporale droite et gauche. Les valeurs de l'IS<sub>final</sub> étaient supérieures pour la condition de reproduction comparée à celles obtenues pendant la condition de reconnaissance (voir Figure 4). Pour les pianistes professionnels, des différences significatives entre les deux conditions ont également été mises en évidence. Dans la

condition de reproduction, les valeurs de l'IS<sub>final</sub> étaient plus élevées pour les zones occipitale et pariétale (voir Figure 5).

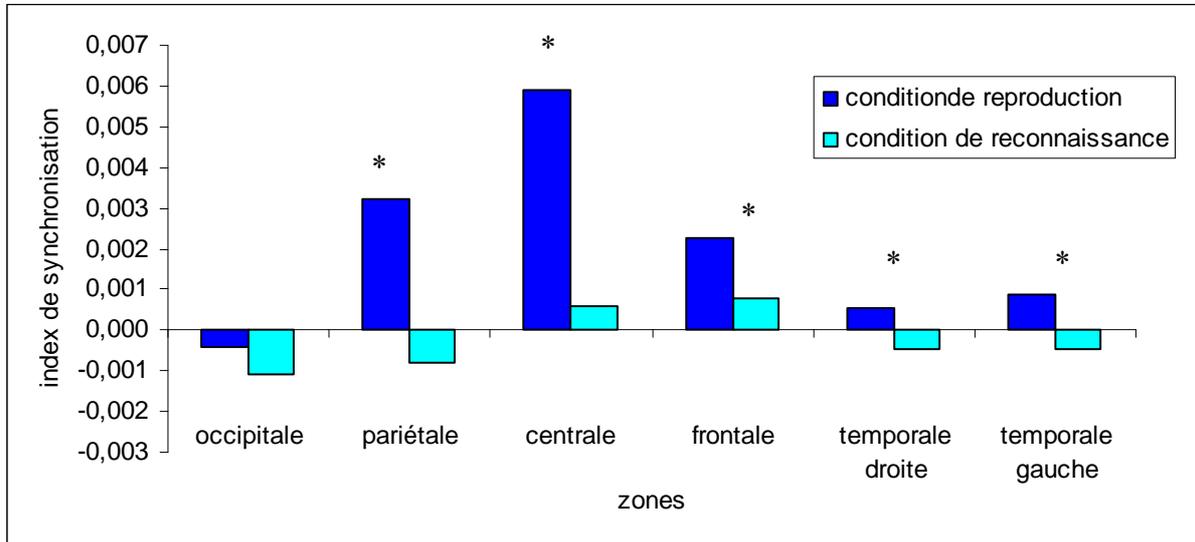


Figure 4. Valeurs de l'IS dans la bande de fréquence 20-30 Hz pour les sujets sans expérience musicale lors des conditions de reproduction et de reconnaissance.

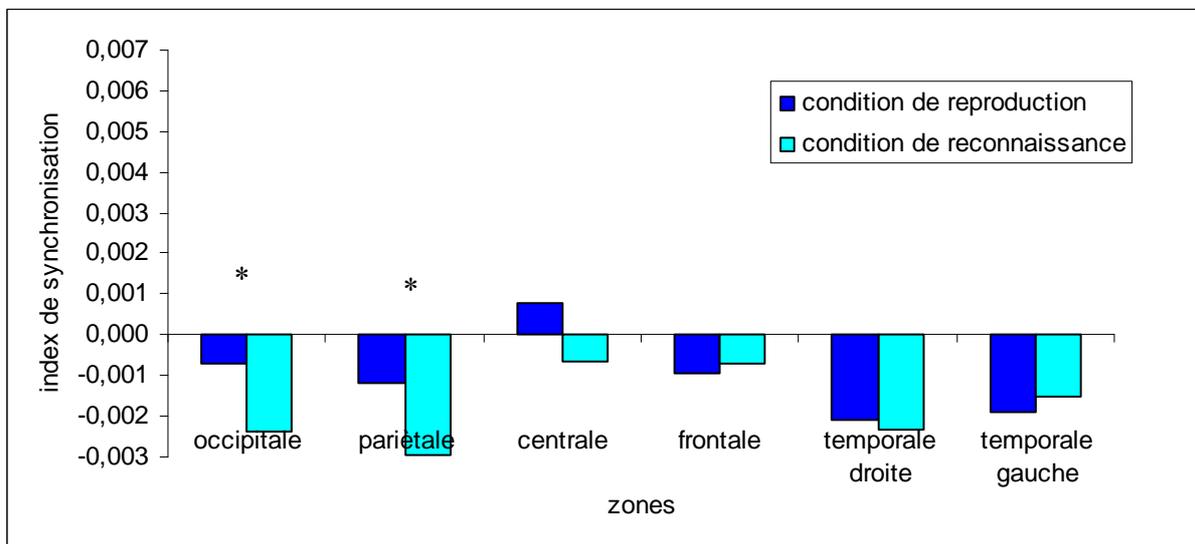


Figure 5. Valeurs de l'IS dans la bande de fréquence 20-30 Hz pour les pianistes professionnels lors des conditions de reproduction et de reconnaissance.

Deuxièmement, des différences significatives ont été identifiées entre les musiciens professionnels et les sujets sans expérience musicale lors de la condition de reproduction au sein des zones pariétale, centrale, frontale, temporale droite et gauche. Des valeurs de l'IS<sub>final</sub> plus élevé chez les sujets sans expérience musicale ont été relevées (voir Figure 6).

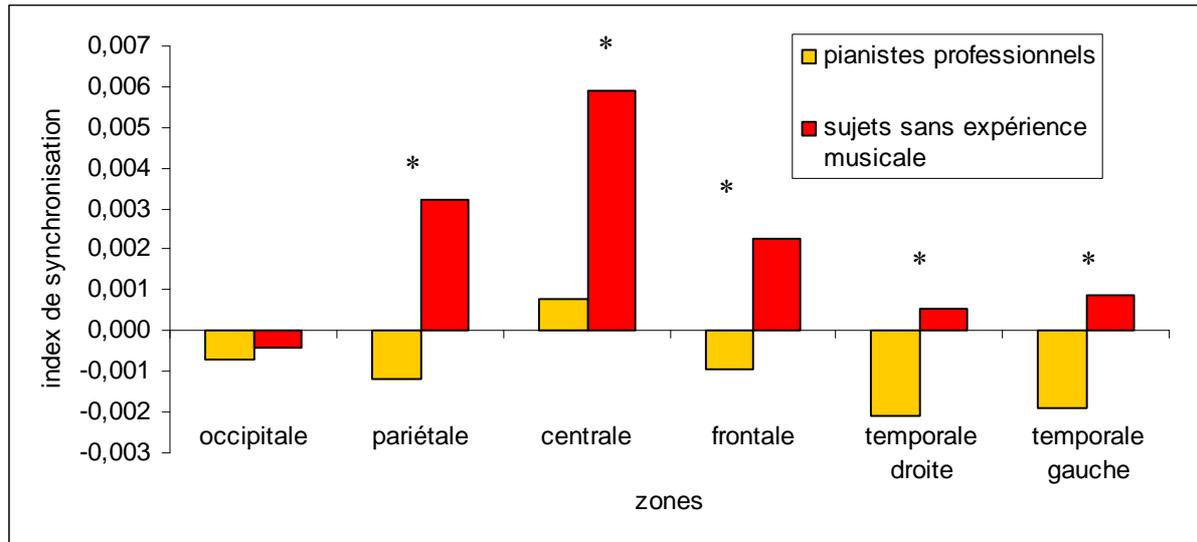


Figure 6. Valeurs de l'IS dans la bande de fréquence 20-30 Hz lors de la condition de reproduction pour les sujets sans expérience musicale et les pianistes professionnels.

Par contre, chez les pianistes professionnels aucune différence significative n'a été décelée (voir Figure 7).

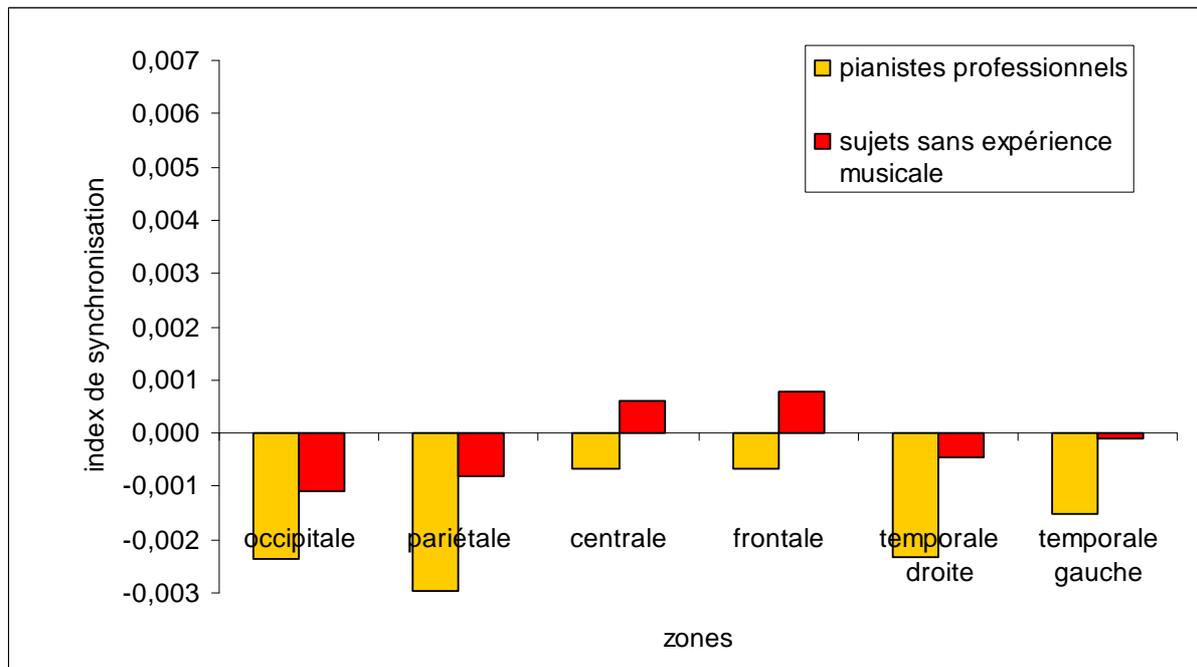


Figure 7. Valeurs de l'IS dans la bande de fréquence 20-30 Hz lors de la condition de reconnaissance pour les sujets sans expérience musicale et les pianistes professionnels.

Troisièmement, les résultats ont révélé des différences significatives au sein de chaque groupe de sujets et de chaque condition (voir Figure 8). Les zones sont regroupées par catégories en fonction de la valeur de leur  $IS_{final}$  et de leurs résultats statistiquement significatifs obtenus via les tests post hoc de Fisher LST. Cette procédure, utilisée par Cochin et al. (1998), permet de mettre en évidence les différences statistiquement significatives entre les zones. Pour les sujets sans expérience musicale, cinq catégories ont été obtenues pour la condition de reproduction contre quatre pour la condition de reconnaissance. Par exemple, pour les sujets sans expérience musicale et pour la condition de reproduction, la valeur de l'IS de la zone centrale était significativement plus élevée que celle de la zone pariétale, qui à son tour, était plus supérieure à celle de la zone frontale, elle-même plus importante que les valeurs de l'IS des zones temporales qui étaient plus hautes que la valeur de l'IS de la zone occipitale. Pour les pianistes professionnels, deux catégories ont été identifiées quelque soit la condition (voir Figure 8).

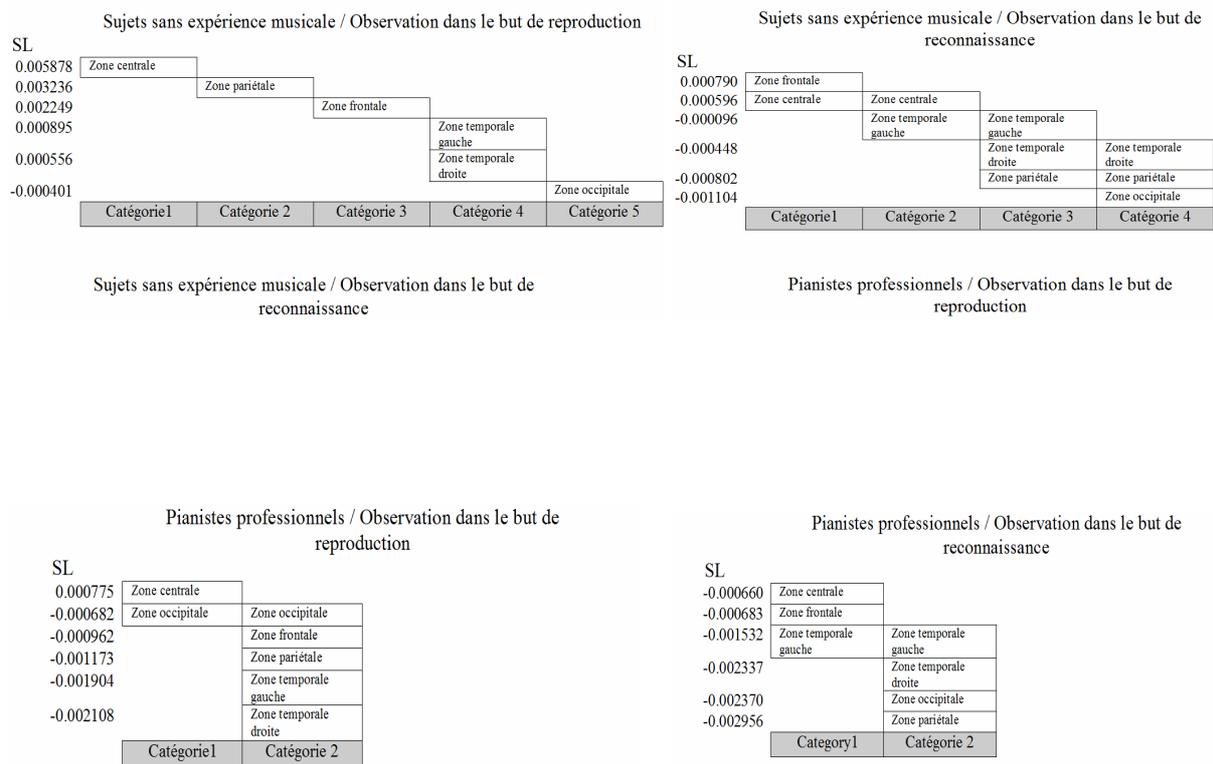


Figure 8. Valeurs de l'IS en fonction des zones pour chaque groupe de sujets et chaque condition.

---

## DISCUSSION

Le but de cette étude était d'examiner, sur trois périodes de 1.254 secondes, l'activité EEG de sujets ne possédant aucune expérience musicale et de pianistes professionnels lorsque ces individus devaient maintenir dans leur mémoire, pendant quelques secondes, des mouvements afin de les reproduire ou de les reconnaître ultérieurement. Le lecteur doit être prudent lors de l'interprétation des résultats de la présente étude. D'une part, les stimuli présentés aux sujets (i.e., des mouvements biologiques) étaient différents de ceux rapportés dans la littérature classique sur la mémoire de travail. D'autre part, le traitement du signal EEG ne reflète pas les mêmes aspects de l'activité corticale obtenue par les techniques d'imagerie cérébrale telles que l'IRMf ou la tomographie par émission de positons (TEP).

### *Considérations méthodologiques*

L'utilisation de l'approche à la première personne (Varela et al., 1999) est intéressante car elle permet de tenir compte des stratégies de mémorisation utilisées par chaque individu durant la phase de rétention. Il est important de constituer des groupes homogènes en fonction de la stratégie de mémorisation utilisée puisque des stratégies différentes sollicitent divers aspects de la mémoire de travail. Par exemple, les répétitions vocales mettent en jeu la mémoire de travail verbale, tandis que les répétitions visuelles font appel à la mémoire de travail visuo-spatiale (Baddeley, 1992). Autrement dit, des aires différentes sont activées lors de répétitions vocales ou visuelles. Le cortex préfrontal gauche, le cortex occipital bilatéral, le cortex prémoteur, l'aire motrice supplémentaire (AMS) et le cortex pariétal postérieur gauche sont impliqués lors de répétitions vocales (Smith et Jonides, 1998 ; Walter et al., 2003). A l'opposé, le cortex dorsal préfrontal droit, le cortex pariétal droit et le gyrus frontal moyen

---

droit sont activés lors de l'utilisation de répétitions visuelles (Walter et al., 2003). Pour résumer, l'emploi de l'approche à la première personne permet de comparer des données qui sont comparables. Néanmoins, cette approche a fait « émerger » une limite concernant les effectifs. Le nombre de sujets dans chaque groupe était faible. 23 sujets ont pris part à l'étude et 15 n'ont pas été pris en compte dans l'analyse car ils utilisaient des stratégies différentes. Bien que les MANOVAs soient des tests statistiques puissants (Tabachnick et Fidell, 2001), le fait que le groupe soit de petite taille limite la généralisation des résultats, même si les sujets et plus précisément les pianistes professionnels présentaient des caractéristiques uniques et exceptionnelles.

### *Activité EEG*

Aucune différence significative dans la connectivité fonctionnelle n'a été décelée entre les trois périodes au niveau de la connectivité fonctionnelle. Ce résultat suggère que, pendant la phase de rétention, les composants de l'activité EEG n'étaient pas transitoires. Ces composants étaient présents pendant l'ensemble de la phase de rétention et ont été qualifiés de soutenus (Tallon-Baudry et al., 1999). L'étude de Tallon-Baudry et al. (1999) a montré l'importance de distinguer les activités soutenues des activités transitoires. En effet, les activités soutenues refléteraient, contrairement aux activités transitoires, les répétitions mentales de la trace sensorielle de l'objet à mémoriser. Ce point est corroboré par le compte-rendu des sujets. Ils ont rapporté utiliser, pendant la phase de rétention, des répétitions visuelles associées à des répétitions vocales afin de se rappeler du mouvement.

La présence de différences de connectivités fonctionnelles dans la bande de fréquence bêta (i.e., 20-30 Hz) confirme les résultats des précédentes études. Les études antérieures ont montré que les oscillations bêta étaient liées à la rétention d'informations (Tallon-Baudry et

---

al., 1998, 1999, 2001) et au processus de répétitions vocales (Hwang et al., 2005), une stratégie utilisée par les sujets de la présente étude.

*Connectivité fonctionnelle lors de la phase de rétention chez des sujets sans expérience musicale*

En accord avec notre première hypothèse, la connectivité fonctionnelle était plus importante lorsque les sujets ne possédant aucune expérience musicale étaient invités à retenir le mouvement observé afin de le reproduire ultérieurement que lorsqu'ils devaient le reconnaître. Ce résultat pourrait être expliqué par le coût des mécanismes relatifs à la préparation de la réponse motrice et à la transformation visuo-motrice, qui serait surtout requis lors de la condition de reproduction et qui serait négligeable lors de la condition de reconnaissance. Cette suggestion est en accord avec les résultats de Pochon et al. (2001) et de Curtis et al. (2004). Ces auteurs ont mis en évidence une activité importante au niveau des aires de Brodmann 46 lorsque les individus avaient l'opportunité de préparer leur réponse comparé à la situation où ils étaient dans l'impossibilité de le faire. Plus précisément, Pochon et al. (2001), en utilisant le paradigme de l'IRMf, ont montré que lorsque les sujets étaient invités à reproduire une séquence visuo-spatiale, le cortex préfrontal dorsolatéral était activé lors de la phase de rétention. Ce n'était pas le cas lorsque ces mêmes sujets devaient réaliser une tâche de reconnaissance, au cours de laquelle ils devaient seulement maintenir l'information en mémoire et ne pas préparer, programmer de réponse. Nos résultats corroborent également ceux de Postle et al. (2000) et Sauseng et al. (2005). Dans leurs protocoles expérimentaux, les sujets étaient soumis à différentes conditions avant d'accomplir une tâche de reconnaissance. La première était de « garder à l'esprit » des stimuli spatiaux, alors que la seconde était de les transformer puis de les maintenir en mémoire pendant de brèves périodes. Par exemple, Sauseng et al. (2005) ont démontré des changements EEG

---

locaux à savoir une synchronisation alpha préfrontale et une désynchronisation occipitale plus importante lorsque les sujets devaient manipuler les informations spatiales et les maintenir en mémoire comparé aux situations où ils devaient uniquement conserver ces informations. Néanmoins, la comparaison avec l'étude de Sauseng doit être réalisée avec discernement puisque les stimuli ainsi que les instructions présentés aux sujets étaient différents (des mouvements biologiques et une tâche de reproduction dans la présente étude vs. des matrices contenant des cibles colorées et une tâche de reconnaissance dans l'étude Sauseng et al.). Ces différences pourraient aussi être provoquées par différentes sortes de transformations (des transformations visuo-motrice dans la présente étude vs. des manipulations ou des transformations mentales dans l'étude de Sauseng et al.).

#### *Connectivité fonctionnelle lors de la phase de rétention chez des pianistes professionnels*

Contrairement à notre deuxième hypothèse, les données ne décrivent pas une équivalence complète au niveau de la connectivité fonctionnelle lorsque les pianistes doivent retenir le mouvement dans un but de reproduction et lorsqu'ils doivent le retenir dans un but de reconnaissance. Les activités au sein des aires occipitale et pariétale affichent des différences significatives entre ces deux conditions. On aurait pu penser que les nombreuses années de pratique musicale amélioreraient l'efficacité du système neuronal en réduisant le processus du traitement de l'information (Haslinger et al., 2004 ; Krings et al., 2000 ; Meister et al., 2005). En effet, l'entraînement musical sollicite et requiert des habiletés telles que réaliser des transformations visuo-motrices complexes (Palmer, 1997), apprendre par observation et imiter les actions du professeur (Haslinger et al., 2005). Les pianistes ont ainsi l'habitude : (i) de maintenir en mémoire des comportements sous forme de représentations dans le but de les reproduire dans un délai de courte durée et (ii) de procéder à des transformations visuo-motrices. Cette expertise, acquise au fil du temps, aurait pu se traduire

---

par un coût nul pour effectuer les opérations relatives aux transformations visuo- motrices et pour préparer la réponse motrice pendant la phase de rétention. Cette explication est en accord avec les résultats obtenus dans les aires centrale, frontale, temporale droite et gauche. Les différences de connectivité fonctionnelle entre les deux conditions expérimentales au sein des aires occipitale et pariétale sont difficiles à expliquer.

### *Expertise*

Des différences au niveau de la connectivité fonctionnelle entre les pianistes professionnels et les sujets sans expérience musicale ont été observées au sein de cinq aires sur six lorsque les sujets maintenaient en mémoire le mouvement dans le but de le reproduire ultérieurement. La synchronisation plus importante chez les sujets sans expérience musicale peut être due au coût généré par les transformations visuo-motrices et par la préparation de la réponse (Passingham et Sakai, 2004). Ceci nous amène à suggérer que le système neuronal des sujets sans expérience musicale ne serait pas aussi efficient ou bien ne serait pas aussi « économique » que le système neuronal des pianistes professionnels qui, eux, sont familiers des transformations visuo-motrices et des préparations motrices.

Lorsque les sujets conservent en mémoire le mouvement dans le but de le reconnaître ultérieurement, l'absence de différence de connectivité fonctionnelle entre les sujets ne possédant aucune expérience musicale et les pianistes professionnels peut s'expliquer par le nombre limité d'informations à retenir. En effet, les sujets ont rapporté utiliser, lors de la phase de rétention, des répétitions visuelles associées à des répétitions vocales. Quatre chiffres ont été répétés (i.e., 1, 2, 3, et 4) ; chaque chiffre correspondant à un doigt. Cette somme d'informations a été perçue par tous les sujets de cette étude comme extrêmement facile. Ce constat va dans le sens de la théorie de Miller (1956) qui revendique que les individus possèdent la capacité de maintenir en mémoire, pendant une courte période

---

temporelle, sept plus ou moins deux informations. Les informations peuvent être des chiffres, des lettres, des mots, ou d'autres entités. En résumé, l'expertise a une influence sur la connectivité fonctionnelle lorsque les sujets doivent retenir un mouvement dans un but reproduction. Lorsque le but est un but de reconnaissance, l'expertise n'influe pas.

Quelque soit la condition, la connectivité fonctionnelle, représentée par la valeur d'IS, révélait des patterns positifs dans la majorité des aires chez les sujets sans expérience musicale (i.e., non-experts dans la dextérité manuelle) et des patterns négatifs chez les pianistes professionnels (i.e., experts dans la dextérité manuelle). Ces patterns négatifs peuvent être considérés comme des indicateurs du niveau d'expertise et peuvent refléter des processus inhibitoires. Les experts ne prendraient pas en considération l'information qui n'est pas utile à la tâche pour être performant, et/ou (ii) bloqueraient les informations issues des essais précédents afin d'empêcher des interférences avec les nouvelles informations devant être retenues. De plus, l'expertise pourrait également se traduire par un nombre plus important d'aires cérébrales « travaillant » à la même intensité (voir Figure 8). Ceci n'est que spéculation. Les résultats de la présente étude ne nous permettent pas de valider ou d'infirmer ces suggestions et des investigations supplémentaires seraient nécessaires pour répondre à ces questions.

## CONCLUSION

En conclusion, cette étude est caractérisée par un certain nombre de forces : (i) l'utilisation de l'approche à la première et à la troisième personne (Varela et al., 1999), (ii) le but de l'étude, qui à notre connaissance, n'a jamais été investigué. Les résultats indiquent que les instructions et le niveau d'expertise influent considérablement sur la connectivité fonctionnelle pendant la phase de rétention. Enfin, cette étude aura permis d'enrichir le corpus de connaissances sur les mécanismes de la mémoire de travail.

---

REFERENCES
------------

- Amunts, K., Schlaug, G., Jäncke, L., Steinmetz, H., Schleivcher, A., Dabringhaus, A., Zilles, K., 1997. Motor cortex and hand motor skills: structural compliance in the human brain. *Hum. Brain. Mapp.* 5, 206-215.
- Babiloni, C., Del Percio, C., Rossini, P.M., Marzano, N., Iacononi, M., Infarinato, F., Lizio, R., Piazza, M., Pirritano, M., Berlutti, G., Cibelli, G., Eusebi, F., in press. Judgement of actions in experts: a high-resolution EEG study in elite athletes. *Neuroimage*.
- Baddeley, A., 2002. Working memory. *Science* 255, 556-559.
- Calmels, C., Hars, M., Jarry, G., Stam, C.J., submitted. Non-linear EEG synchronization during observation: Effects of instructions and expertise. *Neuroimage*.
- Calmels, C., Holmes, P., Jarry, G., Hars, M., Lopez, E., Paillard, A., Stam, C.J., 2006. Variability of EEG synchronization prior to and during observation and execution of sequential finger movement. *Hum. Brain. Mapp.* 27, 251-266.
- Calmels, C., Hars, M., Holmes, P., Jarry, G., Stam, C.J., 2008. Non-linear EEG synchronization during observation and execution of simple and complex sequential finger movements. *Exp. Brain. Res.* 190, 389-400.
- Calvo-Merino, B., Glaser, D.E., Grezes, J., Passingham, R.E., Haggard, P., 2005. Action observation and acquired motor skills: an fMRI study with expert dancers. *Cereb Cortex.* 15, 1243-1249.
- Calvo-Merino, B., Grezes, J., Glaser, D.E., Passingham, R.E., Haggard, P., 2006. Seeing or doing? Influence of visual and motor familiarity in action observation. *Curr Biol.* 16, 1905-1910.

- 
- Curtis, C.E., Rao, V.Y., D'Esposito, M., 2004. Maintenance of spatial and motor codes during oculomotor delayed response tasks. *J. Neurosci.* 24, 3944-3952.
- Decety, J., Grèzes, J., Costes, N., Perani, D., Jeannerod, M., Procyk, E., Grassi, F., Fazio, F., 1997. Brain activity during observation of actions. Influence of action content and subject's strategy. *Brain.* 120, 1763-1777.
- 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.
- Derambure, P., Defebvre, L., Bourriez, J.L., Cassim, F., Guieu, F., 1999. Désynchronisation et synchronisation liées à l'évènement. Etude de la réactivité des rythmes électrocorticaux en relation avec la planification et l'exécution du mouvement volontaire [Event-related desynchronization and synchronization. Reactivity of cortical electroencephalographic rhythms related to planning and performance of voluntary movement]. *Neurophysiol Clin.* 29, 53-70.
- Ericsson, K.A., Krampe, R.T., Tesch-Romer, C., 1993. The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychol. Rev.* 100, 363-406.
- Friston, K.J., 2000. The labile brain. I. Neuronal transients and nonlinear coupling. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 355, 215-236.
- Gaser, C., Schlaug, G., 2003. Brain structures differ between musicians and non-musicians. *J. Neurosci.* 23, 9240-9245.
- Gerloff, C., Richard, J., Hadley, J., Schulman, A.E., Honda, M., Hallett, M., 1998. Functional coupling and regional activation of human cortical motor areas during simple internally paced and externally paced finger movements. *Brain* 121, 1513-1531.
- Grèzes, J., Costes, N., Decety, J., 1998. Top-down effect of strategy on the perception of human biological motion: a PET investigation. *Cogn Neuropsychol.* 15, 553-582.

- 
- Iacoboni, M., Molnar-Szakacs, I., Gallese, V., Buccino, G., Mazziotta, J.C., Rizzolatti, G., 2005. Grasping the intentions of others with one's own mirror neuron system. *PLoS Biology*. 3, 529-535.
- Haslinger, B., Erhard, P., Altenmüller, E., Hennenlotter, A., Schwaiger, M., von Einsiedel, H.G., Rummeny, E., Conrad, B., Ceballos-Baumann, A.O., 2004. Reduced recruitment of motor association areas during bimanual coordination in concert pianists. *Hum. Brain. Mapp.* 22, 206-215.
- Haslinger, B., Erhard, P., Altenmüller, E., Schroeder, U., Boecker, H., Ceballos-Baumann, A.O., 2005. Transmodal sensorimotor networks during action observation in professional pianists. *J. Cognitive. Neurosci.* 17, 282-293.
- Hwang, G., Jacobs, J., Geller, A., Danker, J., Sekuler, R., Kahana, M.J., 2005. EEG correlates of verbal and nonverbal working memory. *Behav. Brain Functions*. 1: 20. doi: 10.1186/1744-9081-1-20.
- Karni, A., 1996. The acquisition of perceptual and motor skills: a memory system in the adult human cortex. *Cognitive Brain Res.* 5, 39-48.
- Klimesch, W., Doppelmayr, M., Schwaiger, J., Auinger, P., Winkler, Th., 1999. Paradoxical alpha synchronization in a memory task. *Cognitive. Brain. Res.* 7, 493-501.
- Klimesch, W., Sauseng, P., Hanslmayr, S., 2007. EEG alpha oscillations: the inhibition-timing hypothesis. *Brain. Res. Rev.* 53, 63-88.
- Koeneke, S., Lutz, K., Wüstenberg, T., Jäncke, L., 2004. Long-term training affects cerebellar processing in skilled keyboard players. *NeuroReport*. 15, 1279-1282.
- 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. *Neurosci. Lett.* 278, 189-193.

- 
- Levy, R., Golman-Rakic, P.S., 2000. Segregation of working memory functions within the dorsolateral prefrontal cortex. *Exp. Brain. Res.* 133, 23-32.
- Manganotti, P., Gerloff, C., Toro, C., Katsuta, H., Sadato, N., Zhuang, P., Leocani, L., Hallett, M., 1998. Task-related coherence and task-related spectral power changes during sequential finger movements. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.* 109, 50-62.
- Meister, I., Krings, T., Foltys, H., Boroojerdi, B., Müller, M., Töpper, R., Thron, A., 2005. Effects of long-term practice and task complexity in musicians and non musicians performing simple and complex motor tasks: implications for cortical motor organization. *Hum. Brain. Mapp.* 25, 345-352.
- Miller, G.A., 1956. The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychol. Rev.* 63, 81-97.
- Millslagle, D., 2002. Recognition accuracy by experienced men and women players of basketball. *Percept. Motor Skill* 95, 163-172.
- Montez, T., Linkenkaer-Hansen, K., van Dijk, B.W., Stam, C.J., 2006. Synchronization likelihood with explicit time-frequency priors. *Neuroimage.* 33, 1117-1125.
- Olfield, R.C., 1971. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia.* 9, 97-113.
- Palmer, C., 1997. Music performance. *Annu. Rev. Psychol.* 48, 115-138.
- Passingham, D., Sakai, K., 2004. The prefrontal cortex and working memory: physiology and brain imaging. *Curr. Opin. Neurobiol.* 14, 163-168.
- Pochon, J.B., Levy, R., Poline, J.B., Crozier, S., Lehericy, S., Pillon, B., Deweer, B., Le Bihan, D., Dubois, B., 2001. The role of dorsolateral prefrontal cortex in the preparation of forthcoming actions: an fMRI study. *Cereb. Cortex* 11, 260-266.
- Postle, B.R., Berger, J.S., Taich, A.M., D'Esposito, M., 2000. Activity in human frontal cortex associated with spatial working memory and saccadic behavior. *J. Cognitive Neurosci.* 12, 2-14.

- 
- Sakai, K., Rowe, J.B., Passingham, R.E., 2002. Active maintenance in prefrontal area 46 creates distractor-resistant memory. *Nat. Neurosci.* 5, 479-484.
- Sarthein, J., Petsche, H., Rappelsberger, P., Shaw, G.L., Von Stein, A., 1998. Synchronization between prefrontal and posterior association cortex during human working memory. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 95, 7092-7096.
- Sauseng, P., Klimesch, W., Doppelmayr, M., Pecherstorfer, T., Freunberger, R., Hanslmayr, S., 2005. EEG alpha synchronization and functional coupling during top-down processing in a working memory task. *Hum. Brain Mapp.* 26, 148-157.
- Semlitsch, H., Anderer, P., Schuster, P., Presslich, O., 1986. A solution for reliable and valid reduction of ocular artifacts, applied to the P300. *ERP. Psychophysiology.* 23, 695-703.
- Smith, E.E., Jonides, J., 1998. Neuroimaging analyses of human working memory. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 95, 12061-12068.
- Stam, C.J., van Cappellen van Walsum, A.M., Micheloyannis, S., 2002. Variability of EEG synchronization during a working memory task in healthy subjects. *Int. J. Psychophysiol.* 46, 53-66.
- Stam, C.J., van Dijk, B.W., 2002. Synchronization likelihood: an unbiased measure of generalized synchronization in multivariate data sets. *Physica D.* 163, 236-251.
- Starkes, J.L., Deakin, J.M., Lindley, S., Crips, F., 1987. Motor versus verbal recall of ballet sequence by young expert dancers. *J. Sport Psy.* 9, 222-230.
- Tabachnick, B.T., Fidell, L.S., 2001. *Using multivariate statistic*, 4<sup>th</sup> edn., Allyn and Bacon, London, 966 pp.
- Tallon-Baudry, C., Bertrand, O., Peronnet, F., Pernier, J., 1998. Induced  $\gamma$ -band activity during the delay of a visual short-term memory task in humans. *J. Neurosci.* 18, 4244-4254.

- 
- Tallon-Baudry, C., Kreiter, A., Bertrand, O., 1999. Sustained and transient oscillatory responses in the gamma and beta bands in a visual short-term memory task in humans. *Visual Neurosci.* 16, 449-459.
- Tallon-Baudry, C., Bertrand, O., Fischer, C., 2001. Oscillatory synchrony between human extrastriate areas during visual short-term memory maintenance. *J. Neurosci.* 21, 1-5.
- Varela, F., Shear, J., 1999. The view from within. First-person approaches to the study of consciousness, 2<sup>nd</sup> edn., Imprint academic, Londres, 313 pp.
- Vermersch, P., 2003. L'entretien d'explicitation, 4<sup>e</sup> edn., Edition ESF, paris, 221 pp.
- Walter, H., Bretschneider, V., Grön, G., Zuzowski, B., Wunderlich, A.P., Tomczak, R., Spitzer, M., 2003. Evidence for quantitative domain dominance for verbal and spatial working memory in frontal and parietal cortex. *Cortex.* 39, 897-911.
- Zentgraf, K., Stark, R., Reiser, M., Kunzell, S., Schienle, A., Kirsch, P., Walter, B., Vaitl, D., Munzert, J., 2005. Differential activation of pre-SMA and SMA proper during action observation: Effects of instructions. *Neuroimage.* 26, 662-672.

---

## **ANNEXES**

**Annexe 1 : Articles réalisés suite à cette étude**

**Annexe 2 : Questionnaire de latéralité adapté d'Oldfield (1971)**

**Annexe 3 : Formulaire de consentement**

---

## ANNEXE 1

### Articles réalisés suite à cette étude

Suite à cette étude, deux articles scientifiques dans des revues internationales et indexées sont actuellement en révision.

#### 1<sup>er</sup> article

Calmels, C., Hars, M., Jarry, G., & Stam, C.J. (in revision). Non linear EEG synchronization during observations: Effects of instructions and expertise. *NeuroImage*.

#### Abstract

The aim of this study was to examine the effects of instructions and expertise upon neuronal changes during observation of sequential finger movements. Eleven professional pianists and twelve musically naïve subjects observed these movements with the aim of either replicating them or recognize them at a later stage. Electroencephalograms were obtained using 19 electrodes. Activity was considered in five frequency bands (4-8 Hz, 8-10 Hz, 10-13 Hz, 13-20 Hz, and 20-30 Hz) using a non-linear measure of functional coupling, the synchronization likelihood. The results showed that, in the 10-13 Hz frequency band and in musically naïve subjects, functional coupling during observation for replica was greater within central and neighbouring areas than during observation for recognition. An opposite pattern was found in the 4-8 Hz frequency band. In contrast, functional coupling did not display differences between observation for replica and observation for recognition among professional pianists for any of the frequency bands. Finally, in the 10-13 Hz frequency band and in areas including the parietal cortex, functional coupling in musically naïve subjects was greater compared to professional pianists under observation for replica. Results are discussed in the light of recent findings from the cognitive and behavioral neuroscience literature and with the aim of shedding some light on the mechanisms underlying the process of observation.

#### 2<sup>ème</sup> article

Calmels, C., Foutren, M., & Stam, C.J. (in revision). Non linear EEG synchronization during a working memory task: Effects of instructions and expertise. *International Journal of Psychophysiology*.

#### Abstract

Level of expertise is probably reflected in different functional brain architecture. The purpose of this study was to examine the effects of instructions and expertise upon neuronal changes during a working memory task. Professional pianists and musically naïve subjects were instructed to retain for a short period of time, sequential finger movements viewed previously with the aim of either replicating them or recognizing them at a later stage. Electroencephalograms were recorded from 19 electrodes. Activity was considered in five frequency bands (4-8 Hz, 8-10 Hz, 10-13 Hz, 13-20 Hz, and 20-30 Hz) using a non-linear measure of functional connectivity, the synchronization likelihood. The results showed that in the 20-30 Hz frequency band and in musically naïve subjects, functional connectivity was greater within the parietal, central, frontal, right and left temporal areas when the subjects were invited to remember the observed movement in order to replicate it compared to the recognition condition in which they had to recognize it. In addition, functional connectivity in musically naïve subjects was greater in all areas except the occipital area compared to professional pianists under the condition for replica. Results are discussed in the light of recent findings from the cognitive and behavioral neuroscience literature.

---

## ANNEXE 2

### Questionnaire de latéralité adapté d'Oldfield (1971)

Nom :

Prénom :

Date de naissance :

Date de passation de l'inventaire :

Indique, s'il te plaît, la main que tu utilises de manière préférentielle dans les activités suivantes en mettant une croix dans la colonne appropriée.

Si cette préférence est tellement affirmée, forte qu'elle ne t'a jamais fourni la possibilité de réaliser l'action avec l'autre main, mets deux croix dans la colonne appropriée. Si tu utilises indifféremment l'une ou l'autre main, mets une croix dans les deux colonnes.

Certaines activités requièrent l'usage des deux mains. Dans ce cas, une précision concernant l'activité est apportée et indiquée entre les parenthèses.

S'il te plaît, essaie de répondre à toutes les questions. Ne réponds pas à la question (c'est-à-dire laisse un blanc) si par hasard, tu n'as jamais réalisé l'activité décrite.

Je te remercie de ta participation.

	GAUCHE	DROITE
1) Ecrire		
2) Dessiner		
3) Lancer		
4) Se servir de ciseaux		
5) Se brosser les dents		
6) Se servir d'un couteau (sans la fourchette)		
7) Se servir d'une cuillère		
8) Se servir d'un balai (Quelle main places-tu sur la partie supérieure du manche?)		
9) Frotter une allumette		
10) Ouvrir une boîte (le couvercle de la boîte)		

Avec quel pied préfères-tu shooter dans un ballon?		
Quel œil utilises-tu quand tu n'en utilises qu'un?		

---

## ANNEXE 3

### Formulaire de consentement

**Nom Prénom :**

**Date de naissance :**

**Téléphone :**

**Email :**

- |                                                                                                                           |     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|
| 1. Avez-vous déjà eu une réaction allergique aux produits chimiques appliqués sur votre peau ?                            | Oui | Non |
| 2. A votre connaissance, avez-vous, ou un membre de votre famille, souffert d'épilepsie ?                                 | Oui | Non |
| 3. Portez-vous habituellement des lunettes ou des lentilles de contact pour un travail réalisé à moins d'1m de vos yeux ? | Oui | Non |
| 4. A votre connaissance, les fonctions et l'anatomie de votre cerveau sont-elles normales ?                               | Oui | Non |
| 5. Avez-vous depuis les dernières 48heures reçu un choc ou un coup sur la tête ?                                          | Oui | Non |
| 6. Souffrez-vous de daltonisme ?                                                                                          | Oui | Non |
| 7. Souffrez-vous de migraine?                                                                                             | Oui | Non |
| 8. Souffrez-vous de dyslexie ?                                                                                            | Oui | Non |

### **Description de l'expérimentation**

Lors de l'expérimentation, vous allez être assis(e) confortablement dans un fauteuil et vous allez être amené(e) à observer certaines scènes sur un écran. Vous allez avoir plusieurs tâches à réaliser : la première tâche sera d'observer une tierce personne réaliser un mouvement des doigts et la deuxième tâche sera soit de réaliser soit de reconnaître le mouvement que vous aurez préalablement observé. Autant que possible, il vous sera demandé(e) de rester immobile, de garder votre mâchoire relâchée, et d'éviter de cligner des yeux. L'ensemble de l'expérimentation va durer approximativement 1H45.

Participer à l'expérimentation implique que vous devez vous laver les cheveux avant de venir, que vous devez éviter de mettre du gel ou de la laque sur vos cheveux, et que vous ne devez pas vous maquiller (pour les personnes de sexe féminin). 6 électrodes seront fixées à la surface de la peau : 4 autour des yeux et 2 derrière chacune de vos oreilles.

Je soussigné(e) \_\_\_\_\_ avoir lu l'ensemble des instructions et les avoir parfaitement comprises. Je suis conscient(e) qu'à tout moment de l'expérimentation, je peux me désister.

Signature du participant :

Date :

Signature de l'expérimentateur :

Date :



## RESUME

Ce rapport se compose de deux études.

### **1<sup>ère</sup> étude** : Synchronisation EEG lors de l'Observation : Effets des Instructions et de l'Expertise

L'objet de cette étude était d'examiner l'influence des instructions et de l'expertise sur les changements neuronaux durant l'observation de mouvements séquentiels. Onze pianistes professionnels et douze sujets sans expérience musicale ont observé ces mouvements dans le but de les reproduire ou de les reconnaître ultérieurement. L'activité cérébrale a été enregistrée à partir de 19 électrodes. Cinq bandes de fréquence (4-8 Hz, 8-10 Hz, 10-13 Hz, 13-20 Hz, et 20-30 Hz) ont été considérées. Une mesure de connectivité fonctionnelle, l'index de synchronisation (Stam et Van Dijk, 2002), a été utilisée. Les résultats ont montré, dans la bande de fréquence 10-13 Hz, chez les sujets sans expérience musicale, et au sein des zones centrales et avoisinantes, une connectivité fonctionnelle plus importante lors de la condition d'observation dans un but de reproduction que lors de la condition d'observation dans un but de reconnaissance. Un pattern opposé a été observé dans la bande de fréquence 4-8 Hz. Par contre, aucune différence de connectivité fonctionnelle chez les pianistes professionnels entre l'observation dans un but de reproduction et l'observation dans un but de reconnaissance n'a été décelée. Enfin, dans la bande de fréquence 10-13 Hz et dans les zones incluant le cortex pariétal, la connectivité fonctionnelle était plus élevée chez les sujets sans expérience musicale que chez les pianistes professionnels lors de la condition d'observation dans un but de reproduction. Les résultats ont été discutés en relation avec les travaux récents réalisés dans le domaine des neurosciences comportementales et ont enrichi le corpus de connaissances sur les mécanismes de l'observation.

Mots clefs : observation, synchronisation, instructions, expertise, EEG

### **2<sup>ème</sup> étude** : Mécanismes EEG Impliqués lors de la Mémorisation de Mouvements : Effets des Instructions et de l'Expertise

L'objet de cette étude était d'examiner l'influence des instructions et de l'expertise sur les changements neuronaux lors de tâches impliquant la mémoire de travail. Des pianistes professionnels et des sujets sans expérience musicale ont été invités à retenir des séquences de mouvements digitaux qu'ils devaient ultérieurement soit reproduire soit reconnaître. L'activité cérébrale a été enregistrée à partir de 19 électrodes. Cinq bandes de fréquence (4-8 Hz, 8-10 Hz, 10-13 Hz, 13-20 Hz, et 20-30 Hz) ont été considérées. Une mesure de connectivité fonctionnelle, l'index de synchronisation (Stam et Van Dijk, 2002), a été utilisée. Les résultats ont montré que, dans la bande de fréquence 20-30 Hz, la connectivité fonctionnelle était plus importante au sein des aires pariétale, centrale, frontale, temporale droite et gauche lorsque les sujets, ne possédant aucune expérience musicale, étaient invités à retenir le mouvement observé afin de le reproduire ultérieurement comparé à la situation où ils devaient le reconnaître. De plus, la connectivité fonctionnelle était plus élevée chez les sujets sans expérience musicale que chez les pianistes professionnels au sein de la majorité des aires lorsque ces participants maintenaient en mémoire le mouvement dans le but de le reproduire. Les résultats ont été discutés en relation avec les travaux récents réalisés dans le domaine des neurosciences.

Mots clefs : mémoire de travail, mouvements, instructions, expertise, EEG, connectivité fonctionnelle