



HAL
open science

Mécanismes impliqués lors de la mémorisation de mouvements sportifs

Claire Calmels, Marion Foutren, Cornelis Stam, Christophe Duverger

► To cite this version:

Claire Calmels, Marion Foutren, Cornelis Stam, Christophe Duverger. Mécanismes impliqués lors de la mémorisation de mouvements sportifs. [Rapport de recherche] Rapport de recherche N° 10-I-003, Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance (INSEP). 2012. hal-01980380

HAL Id: hal-01980380

<https://insep.hal.science/hal-01980380v1>

Submitted on 14 Jan 2019

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.

**SERVICE RECHERCHE
MISSION DU SPORT DE HAUT NIVEAU**

INSEP

**RAPPORT DE RECHERCHE
N° 10-I-003 JUIN 2012**

MÉCANISMES IMPLIQUÉS LORS DE LA MÉMORISATION DE MOUVEMENTS SPORTIFS

Claire CALMELS¹

COLLABORATEURS SCIENTIFIQUES

Marion FOUTREN^{1,2}

Cornelis STAM³,

COLLABORATEUR SPORTIF

Christophe DUVERGER

TRAVAIL EFFECTUÉ PAR LE SERVICE RECHERCHE DE L'INSEP EN COLLABORATION AVEC

*1. Institut National du Sport,
de l'Expertise et de la
Performance, Paris*

*2. Université Paris-Est,
Marne la Vallée*

*3. Department of Clinical
Neurophysiology, VU University
Medical Center, Amsterdam
the Netherland*

*4. Fédération Française de Ski
Nautique et de Wakeboard,
Paris*

FINANCEMENT

Ministère des Sports et INSEP



RÉSUMÉ

L'objet de ce projet était d'examiner l'influence de l'environnement visuel sur les activités électro-corticales lors de tâches de mémorisation de mouvements sportifs. Douze sportifs experts pratiquant des activités de productions de formes (i.e., activités morphocinétiques) ont été invités à retenir des séquences de gestes sportifs qu'ils devaient reconnaître ultérieurement. Ces séquences étaient enchâssées dans des environnements différents : un environnement habituel, écologique (vidéo «classique») et un environnement inhabituel, minimaliste i.e. appauvri en informations visuelles (vidéo animée de points lumineux). L'activité cérébrale a été enregistrée à partir de 64 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'indice de décalage de phase (IDP), a été utilisée. Les résultats ont montré que, dans la bande de fréquence 13-20 Hz, la connectivité fonctionnelle était plus importante au sein des zones frontale et temporale droite lors de la mémorisation de séquences animées de points lumineux que lors de séquences de vidéos «classiques.» Les données ont également mis en évidence que les sujets employaient les mêmes stratégies pour retenir ces séquences et ceci quelque soit le contexte considéré. Les résultats ont été discutés en relation avec les travaux récents réalisés dans le domaine des neurosciences cognitives et plus particulièrement de la littérature sur la mémoire de travail. Des applications pratiques ont été suggérées.

Mots Clefs : Mémoire de travail, Séquences de gestes sportifs, Vidéo «classique», Vidéo animée de points lumineux, EEG, Connectivité fonctionnelle, IDP

SOMMAIRE

Remerciements	p.2
INTRODUCTION GENERALE	p.3
1. ETAT DE L'ART	p.5
2. OBJET D'ETUDE	p.9
3. HYPOTHESES	p.10
4. METHODOLOGIE	p.11
4.1 Sujets.....	p.11
4.2 Tâches Expérimentales.....	p.11
4.3 Procédure Expérimentale.....	p.12
4.3.1 Première étape : acquisition des données EEG.....	p.12
4.3.2 Seconde étape : entretien d'explicitation.....	p.15
4.4 Enregistrement EEG.....	p.15
4.5 Traitement des Données.....	p.16
4.5.1 Segmentation des blocs.....	p.16
4.5.2 Correction des artefacts.....	p.16
4.5.3 Calcul de l'IDP.....	p.16
4.5.4 Analyses statistiques.....	p.17
5. RESULTATS	p.19
5.1 Résultats Qualitatifs.....	p.19
5.2 Résultats Quantitatifs.....	p.19
6. DISCUSSION	p.22
6.1 Résultats Qualitatifs.....	p.22
6.2 Résultats Quantitatifs.....	p.23
6.2.1 Bande de fréquence bêta (13-20 Hz).....	p.23
6.2.2 Différences de connectivité dans les zones frontale et temporales.....	p.23
7. CONCLUSION	p.27
8. REFERENCES	p.28
9. QUELQUES PERSPECTIVES D'APPLICATIONS	p.33
ANNEXE 1 : modèles théoriques de la mémoire.....	p.36
ANNEXE 2 : articles scientifiques.....	p.41

Remerciements

Le projet intitulé «Mécanismes Impliqués lors de la Mémorisation de Mouvements Sportifs» a été soutenu financièrement par le Ministère des Sports et par l'Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance.

Les auteurs de ce rapport remercient sincèrement La Fédération Française de Ski Nautique et de Wakeboard qui a collaboré à ce projet de recherche. Fortement intéressée d'une part, par la compréhension des mécanismes mnémoniques utilisés lors de l'apprentissage et le perfectionnement de gestes techniques sportifs et d'autre part, par les facteurs permettant une meilleure mémorisation de ces gestes, nous espérons qu'elle trouvera des éléments de réponse à ses interrogations.

Enfin, un grand merci également aux sportifs pour leur participation volontaire et active à ce projet.

INTRODUCTION GENERALE

Le but de ce projet était d'améliorer notre connaissance des mécanismes impliqués lors de la mémorisation de mouvements sportifs. En effet, la connaissance de ces processus représente un enjeu important pour le milieu sportif dans la mesure où ces processus sont au cœur de l'apprentissage (moteur), que ce soit dans ses phases initiales ou plus tardives. Prenons l'exemple des disciplines sportives qualifiées de morphocinèses dont le but est la production de formes corporelles codifiées et appréciées visuellement par un corps de juges selon des standards de références précis (e.g., gymnastique, ski nautique, plongeon, natation synchronisée, trampoliner, patinage, voltige équestre, saut à ski, danse classique). Bien souvent dans ces disciplines, les athlètes, pour apprendre une nouvelle séquence gestuelle ou pour en améliorer son exécution, sont amenés à observer des démonstrations, à prélever des informations, à les coder, et à les répéter mentalement (Cadopi, 1994). Ces disciplines réclament donc des capacités mnésiques importantes car les sportifs doivent mémoriser avec précision des actions complexes réalisées autour d'un ou plusieurs axes et/ou retenir de longs enchaînements.

Bien que l'étude de la mémorisation ait fait l'objet de nombreux travaux en psychologie expérimentale et cognitive, aucune recherche ne s'est intéressée aux mécanismes neuronaux mis en jeu lorsqu'un individu devait retenir dans sa mémoire un mouvement sportif. Ce projet s'est donc attaché à investiguer ces mécanismes en prenant en considération l'influence de l'environnement visuel. Le maintien (temporaire) dans la mémoire d'informations de mouvements familiers enchâssés dans des environnements habituels ou issus d'environnements inhabituels, minimalistes i.e. appauvris en stimuli visuels sollicite-t-il les mêmes mécanismes?

Cette recherche s'est appuyée sur le modèle théorique de la mémoire de Baddeley (1986, 1995, 2000, 2003, 2010) et a privilégié des approches à la première personne (Varela, 1996; Varela & Shear, 1999) et à la troisième personne. Plus spécifiquement, les sujets via la verbalisation ont été amenés à décrire la manière dont ils s'étaient organisés pour retenir temporairement dans leur mémoire des informations de mouvements. Cette approche «subjective» a été associée à une approche plus objective (i.e., utilisation de la technique d'électroencéphalographie) afin d'appréhender le processus de mémorisation dans sa globalité

et sa complexité tout en prenant en considération la singularité de l'individu avec son histoire personnelle, sa sensibilité, son vécu expérientiel, et sa culture.

Il nous apparaît essentiel que les entraîneurs, les éducateurs, les professeurs aient connaissance de ces mécanismes. Notre but est de les amener, dans un premier temps, à une réflexion sur leur pratique, et dans un second temps à la mise en place de stratégies, de situations pédagogiques afin d'optimiser la performance des athlètes dont ils ont la charge. Par ailleurs, comme l'ont souligné très justement Keil et al. (2000), sans une connaissance théorique des mécanismes sous-tendant tel ou tel processus, les raisons pour lesquelles telle ou telle intervention sportive échoue ou réussit ne seront jamais parfaitement comprises.

Enfin, ce projet s'est inscrit dans un programme financé par le Ministère des Sports. Il s'est basé sur une collaboration entre (i) le Service Recherche de l'INSEP, (ii) le Département de Neurophysiologie Clinique du Centre Médical Universitaire d'Amsterdam (Pays-Bas), et (iii) la Fédération Française de Ski Nautique et de Wakeboard. Ce projet a également reçu l'avis favorable du Comité de Protection des Personnes (CPP) de l'Ile de France VI (ID RCB : 2009-A00934-53) et l'accord de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire Produits de Santé (AFSSAPS, B91142-40) pour sa réalisation.

Les résultats de ce rapport ont donné lieu à une communication réalisée lors du 18^{ème} Congrès International de «Human Brain Mapping» (10-14 juin 2012, Pékin, Chine). Un article scientifique a également été réalisé. Cet article est sous presse dans la revue internationale indexée «Neuroscience» (IF = 3.215).

1. ETAT DE L'ART

Dans la littérature portant sur la mémoire de travail, les mécanismes sous-jacents au maintien d'informations ont été largement investigués et le modèle sur lequel s'est appuyée la majorité des chercheurs est le modèle de Baddeley et Hitch (1974) et de Baddeley (1986, 1995, 2000, 2003, 2010)¹. Différentes techniques comme l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) (Pochon et al., 2001; Postle et al., 2000; Sakai et al., 2002) ou l'électroencéphalographie (EEG) (Hwang et al., 2005; Sarnthein et al., 1998; Sauseng et al., 2005; Stam et al., 2002; Tallon-Baudry et al., 1998, 1999) ont été utilisées.

Les recherches en imagerie cérébrale ont identifié le rôle majeur du cortex préfrontal lorsque la mémoire de travail était impliquée (Curtis & d'Esposito, 2003; Passingham & Sakai, 2004, pour une revue de littérature). La mémoire de travail est un système qui contrôle le maintien, la manipulation et l'utilisation des représentations mentales (Levy & Goldman-Rakic, 2000). Par exemple, Passingham et Sakai (2004) ont rapporté une activité (soutenue) au niveau du cortex préfrontal lors de tâches impliquant la mémoire de travail. Cette activité reflétait la mise en œuvre de différentes opérations telles que le maintien d'informations sensorielles, la préparation de la réponse, la transformation d'inputs sensoriels en outputs moteurs ou encore l'attente d'une récompense. Dans le même ordre d'idées, Pochon et al. (2001) et Curtis et al. (2004) ont mis en évidence une activité importante au niveau de l'aire de Brodmann 46 lorsque les individus avaient l'opportunité de préparer leur réponse comparée à la situation où ils étaient dans l'impossibilité de le faire. Plus précisément, Pochon et al. (2001), via des examens par IRM, 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 programmer de réponse (motrice). Très récemment, Wolters et Raffone (2008) ont émis l'idée que des boucles corticales récurrentes étaient impliquées dans le maintien d'informations au sein de la mémoire de travail. Des activations ont été observées dans des aires spécifiques telles que le cortex préfrontal, le cortex temporal inférieur lors du codage d'objets (e.g., Ungerleider et al., 1998) et le cortex pariétal lors du codage de localisations (e.g., Curtis et d'Esposito, 2004).

¹ Voir Annexe 1 pour une présentation du modèle de la mémoire de travail de Baddeley (1986, 1995, 2000, 2003, 2010)

Des études utilisant la technique de l'EEG se sont également intéressées aux processus neuronaux mis en jeu lors de la phase de rétention. Les sujets étaient invités à réaliser soit une tâche de reproduction ou de rappel (Sarnthein et al., 1998; Stam et al. 2002) soit une tâche de reconnaissance (Hwang et al., 2005; Sauseng et al., 2005; Sarnthein et al., 1998; Stam et al., 2002; 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.

Cependant, il est 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 séquences visuo-spatiales). A notre connaissance, des démonstrations dynamiques, comme des mouvements biologiques, ont rarement fait l'objet d'expériences. Plus précisément, rares sont les études qui ont investigué les mécanismes corticaux mis 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. On relève l'étude de Fiehler et al. (2008). Ces auteurs ont examiné via l'IRM les régions corticales impliquées lors de la rétention d'informations kinesthésiques issues de l'exécution de mouvements reproduisant des tracés. Les sujets n'avaient pas accès aux informations visuelles lors de la réalisation de ces mouvements. Il a été montré que la partie antérieure du sillon intra-pariétale ainsi que la portion antérieure du lobe pariétal supérieur de l'hémisphère gauche étaient impliquées lors du maintien des informations kinesthésiques dans la mémoire de travail.

Plus récemment, Calmels et al. (2011) ont examiné 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 digitaux qu'ils devaient ultérieurement reproduire ou reconnaître. Les principaux résultats de cette étude ont mis en évidence les points suivants. Premièrement, dans la bande de fréquence 20-30 Hz, 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. Cela s'expliquerait par le coût des mécanismes relatifs à la préparation de la réponse motrice et à la transformation visuo-motrice nécessaire lors de la reproduction du mouvement. D'autre part, les auteurs ont démontré au sein de la bande de fréquence 20-30 HZ une différence de connectivité fonctionnelle au sein de l'aire centrale entre les pianistes professionnels et les sujets sans expérience musicale. La connectivité fonctionnelle moins importante chez les pianistes serait peut être, due à leur pratique pianistique quotidienne nécessitant la réalisation de nombreuses transformations visuo-motrices (Palmer, 1997).

2. OBJET D'ETUDE

Le but de la présente étude était double. Premièrement, il s'agissait d'investiguer les mécanismes électro-corticaux lorsque des athlètes experts devaient maintenir temporairement dans leur mémoire des mouvements sportifs familiers observés précédemment dans le but de les reconnaître ultérieurement. Aucune étude n'a examiné ces mécanismes lorsque l'information à retenir était un mouvement sportif.

Deuxièmement, appréhender l'influence de l'environnement visuel sur ces mécanismes nous a semblé digne d'intérêt. Les mouvements étudiés étaient donc enchâssés dans des environnements différents : un environnement habituel, écologique (vidéo «classique») et un environnement minimaliste i.e. appauvri en informations visuelles (points lumineux animés). L'utilisation de points lumineux animés a permis de mettre en exergue des informations relatives au mouvement (i.e., informations directionnelles, mouvements des différents segments corporels les uns par rapport aux autres) alors que l'emploi de vidéos «classiques» a souligné les sources informationnelles contextuelles et structurelles (i.e. forme, couleur, ombre, texture).

Les sujets retenus dans le cadre de ce projet se composaient de sportifs experts dans leurs disciplines. Les disciplines étaient des disciplines morphocinétiques ou disciplines de productions de formes. Les raisons du choix de ces activités sportives ont été expliquées dans l'Introduction Générale.

La technique de l'EEG a été retenue. Le signal EEG a été analysé via l'indice de décalage de phase (IDP) (Stam et al., 2007). Cette technique est une mesure permettant d'examiner la connectivité fonctionnelle et de déceler les changements linéaires et non linéaires de l'activité corticale. Cette technique prend également en compte la conduction volumique (Stam et al., 2007).

3. HYPOTHESES

Il était attendu que les mécanismes électrocorticaux mis en jeu lors du maintien, dans la mémoire de travail, d'informations de mouvements (sportifs) soient influencés par l'environnement visuel au sein desquels ces mouvements étaient enchâssés. Plus précisément, une connectivité fonctionnelle plus importante lors du maintien d'informations de mouvements lorsque ceux-ci étaient insérés dans des environnements inhabituels (i.e., minimalistes) pourrait être observée comparé à la connectivité relevée lorsque ces mêmes mouvements étaient enchâssés dans des environnements habituels. Un traitement cognitif neuronal supplémentaire serait impliqué pour le traitement d'informations visuelles inhabituelles et peu nombreuses.

Il a été également suggéré que la bande de fréquence bêta était la plus susceptible de refléter des différences, cette bande étant reconnue comme jouant un rôle dans le processus de rétention d'informations (Altamura et al., 2010; Calmels et al., 2011; Hwang et al., 2005; Leiberg et al., 2006; Pesonen et al., 2007; Tallon-Baudry et al., 1998, 1999; Tallon-Baudry et al., 2001).

4. METHODOLOGIE

4.1 Sujets

Douze sportifs experts pratiquant des disciplines morphocinétiques ($M = 21$, $SD = 4.1$) et ne présentant aucun antécédent neurologique ou psychiatrique, ont participé de manière volontaire à l'étude. Les sujets étaient tous majeurs et au moment de l'expérimentation, ils ne devaient pas être blessés : ils devaient être capables de réaliser (physiquement) les mouvements sportifs qu'ils auraient à mémoriser dans le cadre de la procédure expérimentale. Les sujets ont rempli un formulaire de consentement. Ils étaient également naïfs quant aux objectifs de l'étude.

L'étude a reçu l'avis favorable du Comité de Protection des Personnes Ile de France VI (CPP) (ID RCB : 2009-A00934-53) et l'accord de l'Agence Française Sécurité Sanitaire des Produits de Santé (AFSSAPS, B91142-40).

4.2 Tâches Expérimentales

Un sportif de niveau international, n'ayant pas pris part à l'étude, a été filmé lors de la réalisation de 30 séquences de gestes sportifs ou morphocinèses. Les 30 séquences de morphocinèses ont été choisies parmi un panel de 80 séquences dans le but d'homogénéiser le niveau de difficulté de reconnaissance de ces séquences. Pour ce faire, une évaluation a été réalisée auprès de deux juges nationaux via une échelle de Likert en cinq points (i.e., «très facile» à «très difficile»). Le niveau de difficulté de reconnaissance de chaque séquence a été apprécié et les séquences jugées comme les plus difficiles à reconnaître ont été retenues dans le cadre de cette étude.

Suite à la sélection des séquences, le sportif de niveau international a été amené à réaliser ces séquences dans deux situations. Dans la première situation (A), à l'aide d'une caméra numérique DV, 30 vidéos ont été produites. Ces images ont été numérisées. Trente séquences vidéo «classiques» de dix secondes, c'est-à-dire des séquences vidéo telles que l'on peut les visionner communément sur un écran de télévision ont été obtenues. Dans la deuxième situation (B), ces séquences ont été enregistrées à l'aide du système optoélectronique Vicon 612 au sein du laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industriel et Humaines de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-

Cambrésis (UMR CNRS 8530) afin d'obtenir 30 vidéos de points lumineux animés (voir Figure 1). Ce système de mesure a permis le recueil des positions tridimensionnelles de marqueurs rétro-réfléchissants (i.e., sphères de 14 mm de diamètre recouvertes de Scotch-lite) fixés sur des points anatomiques du corps d'un individu en référence au modèle anthropométrique retenu et dans un volume calibré. Ce système a isolé notamment des marqueurs passifs de leur environnement par réfléchissement de la lumière infrarouge permettant ainsi d'extraire des séquences animées de points lumineux. Dans le cadre de cette étude, 32 marqueurs rétro-réfléchissants ont été placés sur la gymnaste ayant réalisé les enchaînements selon le Plug-in-Gait Marker Placement (Plug-In Gait Marker Set, Vicon). Huit caméras CCD (Charge Coupled Device) de haute résolution (1880 pixels x 881 pixels) opérant à 120 Hz ont été utilisées. La fréquence d'acquisition était de 120 Hz. Ce système a autorisé l'extraction de séquences animées de points lumineux. Ces séquences de points lumineux avaient une durée de dix secondes.



Figure 1 : Images extraites d'une séquence animée de points lumineux.

4.3 Procédure Expérimentale

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

4.3.1 Première étape : acquisitions des données EEG

Lors de la première étape, les sujets ont été testés individuellement et ont été soumis à deux conditions expérimentales de mémorisation au cours desquelles un enregistrement EEG

a été effectué. Durant l'enregistrement EEG, les sujets étaient assis dans un fauteuil, leurs avant bras posés sur les accoudoirs et la tête reposant sur une têtère. L'expérimentation, a été expliquée au sujet (voir ci-dessous). Les sujets ont bénéficié d'une période de familiarisation pour réaliser la tâche de reconnaissance. Quatre essais ont été présentés (i.e., deux séquences vidéos «classiques» et deux séquences animées de points lumineux) et un guidage verbal a été mis en place. Ces quatre essais n'ont pas été inclus dans le traitement des données.

Lors des conditions expérimentales de mémorisation, les sujets ont été confrontés à l'observation de séquences de gestes sportifs/morphocinèses. La consigne donnée aux sujets était d'observer ces séquences dans le but de les reconnaître ultérieurement. Deux sortes de séquences étaient visionnées : (i) des séquences de vidéos «classiques» et (ii) des séquences animées de points lumineux. Chaque séquence a été intégrée dans un ensemble composé de cinq phases qui ont constitué un essai (voir Figure 2). 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 «observer pour reconnaître » apparaissait à l'écran et invitait le sujet à observer la séquence dans le but de la reconnaître ultérieurement. Lors de la phase 2, d'une durée de 10 secondes, le sujet observait une séquence de gestes sportifs/morphocinèses soit «classique» soit animée de points lumineux. Durant la phase 3, d'une durée de 5 secondes, un fond orange indiquait au sujet de rester concentré. Pendant la phase 4, d'une durée de 10 secondes, le sujet observait de nouveau une séquence de gestes sportifs/morphocinèses similaire ou différente de celle présentée lors de la phase 2. Cette séquence présentait le même format de stimuli visuels que le format visionné lors de la phase 2. Lors de la phase 5, d'une durée de 6 secondes, le sujet regardait un écran rouge. Le mot «répondre» apparaissait lors des deux premières secondes de cette phase invitant le sujet à serrer son poing si la seconde séquence était différente de la première. Pour les séquences similaires, le sujet était invité à ne rien faire. La réponse donnée, le sujet était invité à ne penser à rien, à se détendre ou encore à cligner les yeux. Lors de cette phase, l'expérimentateur vérifiait l'exactitude des réponses du sujet confronté à aux tâches de reconnaissance. Les réponses erronées (i.e., les mauvaises reconnaissances) n'ont pas été prises en compte dans le traitement des données. 50% des séquences étaient identiques et 50% étaient différentes.

L'intervalle de temps entre le début de la phase 1 et la fin de la phase 5 était de 35 secondes.

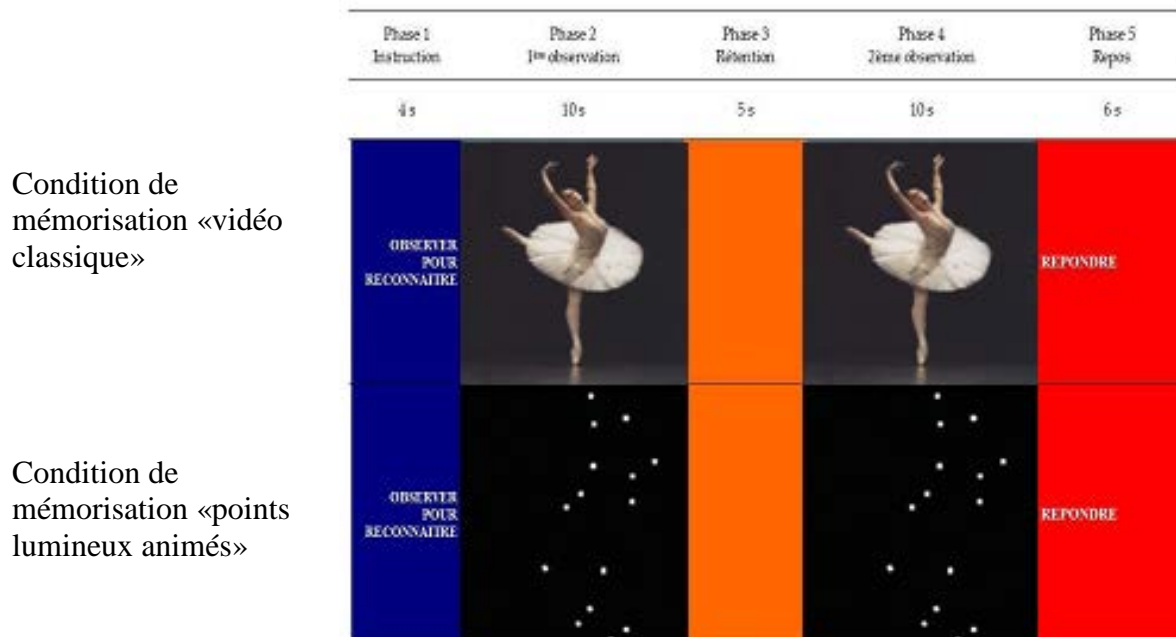


Figure 2 : Découpage temporel d'un essai. Exemples de stimuli utilisés

Pour chaque essai, un trigger 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 huit minutes comprenant 15 essais étaient réalisés par chaque sujet. Une période de repos de 5 minutes a été octroyée entre chaque bloc. L'ordre des 60 essais (i.e., 30 séquences vidéo «classiques» et 30 séquences animées de points lumineux) a été randomisé.

4.3.2 Seconde étape : entretien d'explicitation

Lors de cette étape, des entretiens d'explicitations (Vermesch, 2003) ont été menés afin de mettre en évidence les stratégies utilisées par les 13 sujets lors de la phase 3 (i.e., phase de rétention). Ceci a permis de coupler une approche à la première personne dite subjective (e.g., entretien) et une approche à la troisième personne dite objective (e.g., analyse de données enregistrées via la technique d'EEG) (Varela et al., 1999). Le but de cette démarche était d'appréhender finement l'expérience consciente des sujets, autrement dit de prendre en considération leur singularité, leur histoire personnelle, leur sensibilité, leur vécu et leur culture. Dans le cas de la présente étude, il s'agissait d'inciter le sujet à expliquer comment il s'était organisé pour retenir la séquence observée c'est-à-dire quelles stratégies il avait utilisées.

4.4 Enregistrement EEG

Premièrement, l'activité électrique cérébrale a été enregistrée à partir de 64 électrodes disposées selon un montage monopolaire matriciel inspiré du système international 10-10 (Nuwer et al., 1999), fixées sur un bonnet élastique en lycra (synAmps2 64 channels Quick-Cap, Neuromedical supplies, Charlotte, NC, USA). Deux électrodes de référence, placées sur les mastoïdes droite et gauche du participant et une électrode de terre positionnée entre FPZ et FZ, ont été utilisées. L'activité électrique propre au mouvement 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, 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. L'amplificateur EEG était un amplificateur Synamps 2 Neuroscan (Compumedics, El Paso, TX). La bande passante était de 0.05 à 100 Hz et était échantillonnée à la fréquence de 500 Hz. La résolution était de 24 bits.

Deuxièmement, les données EEG ont été reformatées en référence commune moyenne. Comme l'ont indiqué Stam et de Bruin (2004), les montages utilisant les mastoïdes comme référence ont pour propriétés d'accentuer le couplage interrégional au détriment du couplage local alors que les montages en dérivation de source présentent des caractéristiques inverses.

L'utilisation d'un montage en référence commune moyenne présente un bon compromis (Nunez et al., 1992) et a été utilisé dans la présente étude.

4.5 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.

Le traitement des données s'est composé de trois phases : (a) la segmentation des blocs, (b) la correction des artefacts, et (c) le calcul de l'indice de décalage de phase (IDP).

4.5.1. Segmentation des blocs

Pour les deux conditions expérimentales, trente essais vidéo «classique» et 30 essais animés de points lumineux, d'une durée totale de 35 secondes chacun, ont été réalisés. Seule la phase de rétention, c'est-à-dire la phase 3, a été prise en compte dans l'analyse de la présente étude. Dans cette phase de rétention, d'une durée de cinq seconde, la première seconde n'a pas été prise en compte afin que le sujet puisse s'habituer au nouvel écran de couleur orange. Ainsi, seules les quatre dernières secondes ont été retenues.

4.5.2 Correction des artefacts

Une correction des artefacts oculaires a été réalisée par le biais d'un filtrage spatial et la création d'un fichier SVD (i.e., décomposition en valeurs singulières) qui a été appliqué aux données d'origine (logiciel Scan, 4.4, révision E, 2007).

4.5.3 Calcul de l'IDP

L'IDP est une mesure de connectivité fonctionnelle. La connectivité fonctionnelle met en évidence les corrélations qui peuvent exister dans l'espace et le temps entre différentes régions cérébrales lors d'une situation donnée. Cette mesure présente l'avantage d'être très peu influencée par la présence de sources communes ou par la conduction volumique (Montez et al., 2006). L'IDP a été calculée pour chacun des essais des deux conditions expérimentales, pour chacun des 12 sujets, pour chacune des électrodes, pour chacune des cinq bandes de fréquence, et pour les quatre dernières seconde de la phase de rétention. La première seconde n'a pas été prise en compte afin que les sujets puissent s'habituer au changement de couleur de l'écran. Pour chaque condition expérimentale, les 30 valeurs de l'IDP ainsi obtenues ont été moyennées, et ce pour chaque sujet, chaque électrode, et chaque bande de fréquence. Les

valeurs d'IDP s'échelonnent dans une fourchette allant de 0 à 1, 1 correspondant à une synchronisation maximale et 0 à une absence de synchronisation.

Pour accroître la puissance statistique, les valeurs d'IDP pour les électrodes F7-F5-F3-F1-FZ-F2-F4-F6-F8 ont été moyennées et une valeur d'IDP pour la zone frontale a été obtenue. La même procédure a été appliquée pour FT7-T7-TP7-CP5-P7-P5, FT8-T8-CP6-TP8-P6-P8, FC5-FC3-FC1-FCZ-FC2-FC4-FC6-C5-C3-C1-CZ-C2-C4-C6, CP3-CP1-CPZ-CP2-CP4-P3-P1-PZ-P2-P4, et PO7-PO5-PO3-POZ-PO4-PO6-PO8-O1-OZ-O2. Six zones ont donc été déterminées : la zone frontale (F7-F5-F3-F1-FZ-F2-F4-F6-F8), la zone temporale gauche (FT7-T7-TP7-CP5-P7-P5), la zone centrale (FC5-FC3-FC1-FCZ-FC2-FC4-FC6-C5-C3-C1-CZ-C2-C4-C6), zone temporale droite (FT8-T8-CP6-TP8-P6-P8), la zone pariétale (CP3-CP1-CPZ-CP2-CP4-P3-P1-PZ-P2-P4) et la zone occipitale (PO7-PO5-PO3-POZ-PO4-PO6-PO8-O1-OZ-O2) (voir Figure 3).

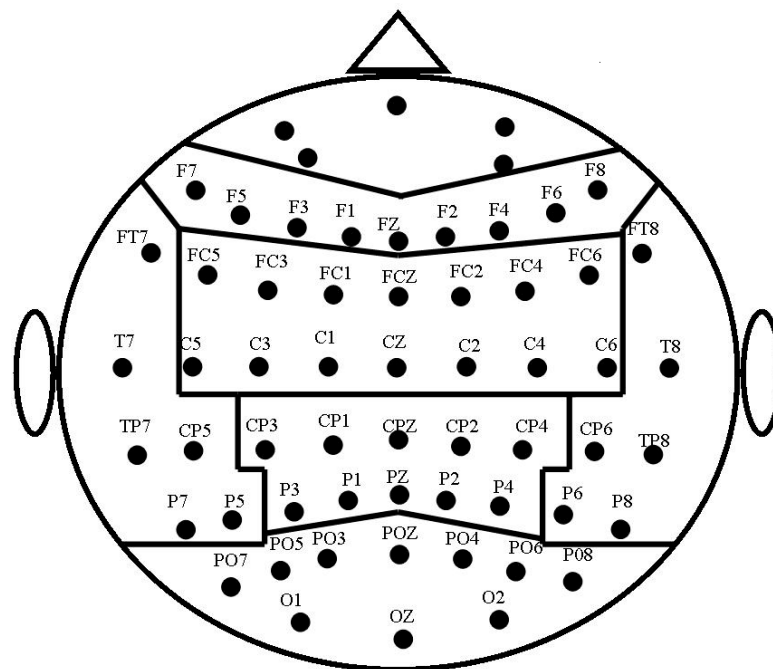


Figure 3. Les six zones d'intérêt.

4.5.4 Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Statistica Software 7.1. Pour chacune des bandes de fréquence, des 2 (Condition) x 6 (Zone) ANOVAs à mesures répétées ont été effectuées. Les facteurs étaient des facteurs intra-groupes (condition, deux niveaux : mémorisation de vidéos classiques, mémorisation de points lumineux ; zone, six

niveaux : frontale, temporale gauche, centrale, temporale droite, pariétale, et occipitale). La procédure du «False Discovery Rate» (FDR, Espérance du Taux de Faux Positifs; Benjamini & Hochberg, 1995) a été utilisée pour ajuster la valeur de p pour tenir compte des comparaisons multiples qui ont été réalisées (i.e., 5 ANOVAs). Des tests post hoc (Duncan test) ont été réalisés lorsque les résultats des ANOVAs étaient significatifs et les tailles d'effet (pour des mesures répétées) (Long & Van Stavel, 1995) ont été calculées. Avant d'effectuer les ANOVAs, le test de Kolmogorov Smirnov a été réalisé afin de vérifier la normalité de la distribution des données. L'hypothèse de sphéricité, elle, a été testée au moyen du test de Mauchly. L'interaction Condition x Zone a été examinée car elle était directement liée à l'objet de l'étude.

5. RESULTATS

5.1 Résultats Qualitatifs

Premièrement, les entretiens réalisés suite à l'acquisition des données EEG ont mis en exergue trois stratégies de mémorisation (voir Table 1). La première stratégie était la répétition sub-vocale. Six sujets se servaient de cette première stratégie lors de la mémorisation de séquences de vidéos «classiques» contre sept sujets pour la mémorisation de séquences animées de points lumineux. La seconde stratégie combinait la répétition sub-vocale et l'imagerie mentale et était employée par cinq sujets lors de la mémorisation de séquences animées de points lumineux alors que quatre sujets l'utilisaient lors de la mémorisation de vidéos «classiques.» Enfin, deux sujets ont rapporté n'utiliser aucune stratégie que ce soit pour mémoriser des séquences de points lumineux ou des séquences de vidéos.

Table 1. Stratégies utilisées par les sujets lors de la mémorisation de séquences animées de points lumineux et de vidéos «classiques»

	Mémorisation de séquences animées de points lumineux	Mémorisation de séquences de vidéos «classiques»
Répétition sub-vocale	7	6
Imagerie + Répétition sub-vocale	4	5
Aucune stratégie	1	1

5.2 Résultats Quantitatifs

Les données EEG étaient normalement distribuées et l'hypothèse de sphéricité était vérifiée. La procédure du FDR a été conduite et la valeur ajustée de p était de .01. Seuls les résultats concernant l'interaction Condition x Zone ont été reportés et détaillés en raison de leur lien direct avec l'objet d'étude (Voir Table 2).

Table 2. Résumé des 2 (Condition) x 6 (Zone) ANOVAs pour chacune des bandes de fréquence lors de la phase de rétention * $p < .008$

	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>
Condition	1.470	.25	0.000	.99	1.356	.27	0.429	.53	1.716	.22
Zone	1.180	.33	0.167	.97	0.155	.34	1.391	.24	2.436	.04
Condition x Zone	0.580	.72	0.211	.96	0.900	.49	3.524	*	0.650	.66

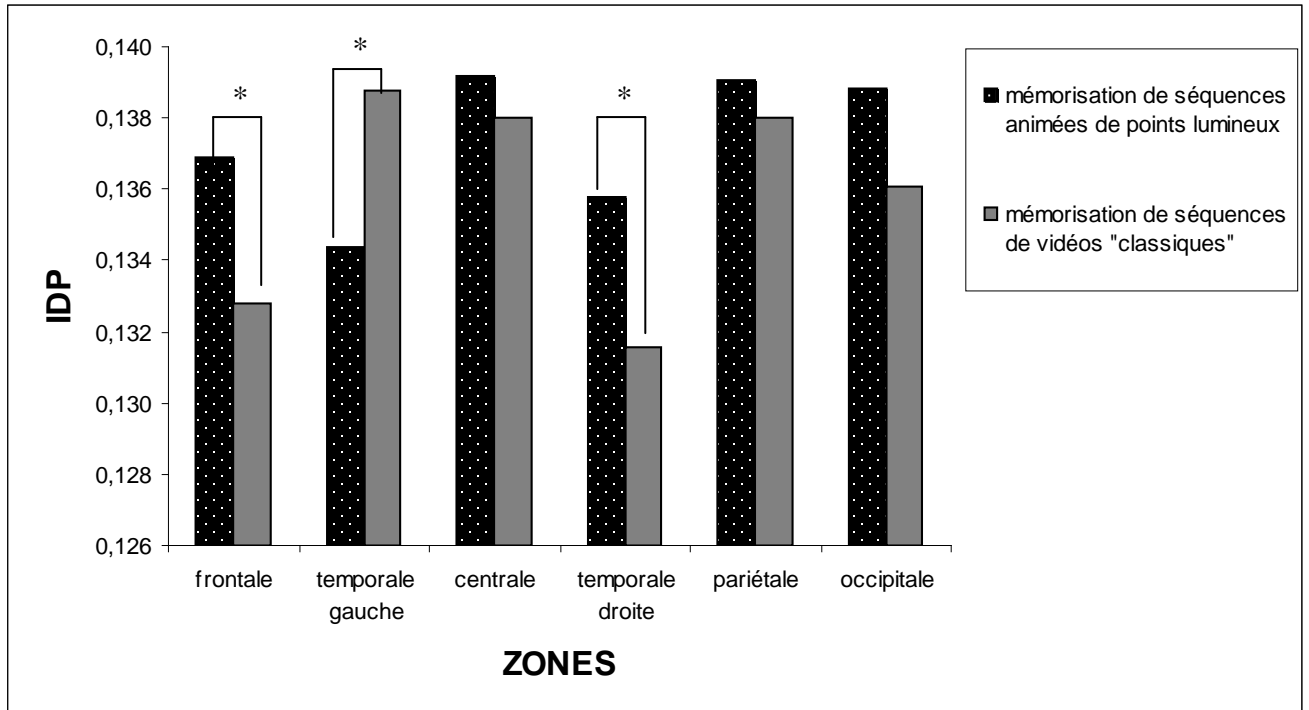
Les effets Condition et Zone n'étaient pas significatifs. L'effet Zone n'a pas «survécu» à la procédure du FDR qui a instauré un seuil de significativité à $p < .01$.

L'interaction Condition x Zone était significatif pour la bande de fréquence 13-20 Hz : $F(5,55) = 3.524, p < .008$. Des post hoc (Duncan test) ont été réalisés sur l'interaction Condition x Zone et les résultats suivants ont été trouvés.

Des différences significatives de mesure IDP entre les deux conditions expérimentales ont été trouvées pour les zones frontale, temporale gauche et droite. Plus spécifiquement, pour la zone frontale et la zone temporale droite, les valeurs IDP étaient supérieures pour la condition de mémorisation de séquences animées de points lumineux comparées à celles obtenues pour la condition de mémorisation de séquences de vidéos «classiques» (0.1369 vs. 0.1328, $p < .035$, ES = 0.36, zone frontale; 0.1358 vs. 0.1315, $p < .025$, ES = 0.47, zone temporale droite) (voir Figure 4). Pour la zone temporale gauche, la valeur IDP était plus élevée pour la condition de mémorisation de vidéos «classiques» (0.1344 vs. 0.1388, $p < .030$, ES = -0.32) (voir Figure 4).

Figure 4. Valeurs IDP dans la bande de fréquence 13-20 Hz lors des conditions de mémorisation de séquences animées de points lumineux et de séquences de vidéos «classiques».

Note.* $p < .035$



6. DISCUSSION

6.1 Résultats Qualitatifs

Les résultats qualitatifs issus des entretiens s'inscrivent dans la lignée du modèle théorique de Baddeley et de ses collaborateurs sur la mémoire de travail (Baddeley, 1986, 2000, 2010; Baddeley & Hitch, 1974; Repovs & Baddeley, 2006). Pour résumer, ce modèle se compose d'un administrateur central ou exécutif central, de deux sous-systèmes permettant le maintien des informations verbales et visuo-spatiales respectivement appelé la boucle phonologique et le calepin visuo-spatial, et d'un tampon épisodique. Dans ce modèle, le maintien des informations s'effectue via de deux composantes : (i) un stockage passif (l'unité de stockage phonologique pour la boucle phonologique et le cache interne pour le calepin visuo-spatial) et (ii) un mécanisme actif de répétitions des informations (i.e., le contrôle articulatoire ou boucle articulatoire pour la boucle phonologique et le scribe interne pour le calepin visuo-spatial). L'unité de stockage phonologique et le cache interne sont dédiés au maintien des informations pendant une période de l'ordre de quelques secondes. Pour éviter leur oubli, les sujets doivent les répéter. Lorsque les informations ont besoin d'être manipulées, l'administrateur central est mis en jeu (Baddeley, 2010; Repovs & Baddeley, 2006). Selon Henson (2001, p.151), le processus de manipulation ne se résume pas à un simple stockage. Ce processus nécessite une transformation de l'information. Par exemple, réorganiser les mots présentés sur une liste selon l'ordre alphabétique pourrait être défini comme une manipulation. L'administrateur central semble également jouer un rôle non négligeable dans le contrôle attentionnel (i.e., concentration, division de l'attention, «switch» de l'attention) (Baddeley, 2010; Repovs & Baddeley, 2006).

Dans la présente étude, les sujets rapportaient utiliser soit la répétition subvocale, soit la combinaison de la répétition sub-vocale et l'imagerie mentale afin de retenir, mémoriser les différentes séquences qui leur étaient présentées dans le but de les reconnaître ultérieurement. Ces différentes stratégies peuvent être identifiées comme étant des stratégies de répétition qui ont pour but de prévenir le risque d'oubli et de perte d'informations. Elles correspondent au mécanisme actif de répétition décrit par Baddeley (1986, 2000, 2010). D'autre part, deux sujets ont déclaré n'utiliser aucune stratégie. Cela peut s'apparenter au stockage passif des informations du modèle de la mémoire de travail de Baddeley. Enfin, la majorité des sujets a rapporté utiliser la répétition sub-vocale seule ou en association avec l'imagerie mentale. Ceci

met en évidence que les sujets ont transformé les séquences visuelles de gestes sportifs/morphocinèses en structures phonologiques. Les structures ainsi obtenues ont été répétées à plusieurs reprises pendant la phase de rétention. Cette stratégie utilisée par de nombreux sujets est en parfaite adéquation avec le modèle de la boucle phonologique (Baddeley, 1986; Burgess & Hitch, 1999). La boucle phonologique est en mesure de traiter des informations présentées visuellement lorsque ces dernières sont transformées en structures phonologiques grâce aux répétitions sub-vocales (Wilson et Emmorey, 1997) (voir Annexe 1 pour des informations additionnelles).

6.2 Résultats Quantitatifs

6.2.1 Bande de fréquence bêta (13-20 Hz)

La présence de différences de connectivité fonctionnelle dans la bande de fréquence bêta (i.e., 13-20 Hz) est en accord avec notre seconde hypothèse. Elle corrobore également les résultats de littérature qui ont mis en évidence que les oscillations bêta étaient liées à la rétention d'informations (Altamura et al., 2010; Calmels, Foutren et al., 2011; Hwang et al., 2005; Tallon-Baudry et al., 1998, 1999, 2001). Ce point est d'ailleurs confirmé par les entretiens réalisés auprès des sujets. Plusieurs sujets ont affirmé utiliser l'imagerie mentale et la répétition sub-vocale en vue de mémoriser les séquences de gestes sportifs/morphocinèses.

6.2.2 Différences de connectivité fonctionnelle dans les zones frontale et temporales

Les différences trouvées dans les zones frontale et temporales ne constituent pas un résultat surprenant. Il est en fait reconnu que ces zones sont impliquées lors de tâches impliquant la mémoire de travail et plus spécifiquement lors des phases de rétention (Altamura et al., 2010; Barcth et al., 1997; Courtney et al., 1997; Druzgal & d'Esposito, 2003; Ranganath et al. 2004; Sakai & Passingham, 2006; Smith et al., 1995). Par exemple, lors de tâches impliquant la mémoire de travail, Ranganath et al. (2004) ont montré, via l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), que les cortices préfrontal et temporal inférieur étaient activés et jouaient un rôle complémentaire dans le maintien des informations au sein de la mémoire de travail. Le cortex temporal était davantage sensible à la nature des informations alors que le cortex préfrontal était, lui, affecté par la quantité d'informations à retenir.

6.2.2.1. Zones frontale et temporale droite. Les différences de connectivité fonctionnelle révélées dans le cadre de la présente étude peuvent être expliquées de deux

façons. La première explication découle des résultats qualitatifs. Les sujets ont déclaré utiliser des stratégies de mémorisation similaires dans les deux conditions expérimentales (i.e., répétition sub-vocale et combinaison de la répétition sub-vocale et de l'imagerie mentale, et aucune stratégie). En d'autres termes, les stratégies utilisées ne diffèrent pas qu'il s'agisse de mémoriser des séquences de vidéos «classiques» ou des séquences animées de points lumineux. Plus particulièrement, le contenu et les caractéristiques de l'imagerie mentale sont similaires que ce soit pour mémoriser des séquences de vidéos «classiques» ou des séquences animées de points lumineux. Dans les deux cas, le contenu comprend des informations visuelles de couleurs, de formes, d'ombres et de contours. Ceci implique que, suite à l'observation de séquences animées de points lumineux, les sujets ont réalisé une manipulation : ils ont transformé les informations représentées sous forme animée de points lumineux en représentations mentales incluant des informations structurelles et contextuelles comme les couleurs, les formes, et la musculature. On peut suggérer que cette manipulation mentale a nécessité des ressources supplémentaires qui se sont exprimées par une connectivité fonctionnelle supérieure dans les zones frontale et temporale droite lors de la condition de mémorisation de séquences animées de points lumineux comparée à la condition de mémorisation de séquence de vidéos «classiques.» Cette interprétation est en concordance avec les résultats trouvés par Sauseng et al. (2005). Ces auteurs ont montré l'existence d'une cohérence plus élevée lorsque les sujets devaient manipuler des informations spatiales et les maintenir en mémoire comparé à la situation où ils devaient simplement les conserver avant d'effectuer une tâche de reconnaissance.

Une seconde explication peut être avancée. L'activité corticale, durant la phase de rétention, serait sensible à la difficulté perceptive attendue de la tâche de reconnaissance à réaliser. Premièrement, dans la présente étude, il est important de souligner que les notions de «difficulté de la tâche» et des «exigences de la mémoire de travail» ne sont pas confondues comme c'est parfois le cas dans la littérature. Dans les deux conditions expérimentales, les exigences étaient similaires : les sujets devaient mémoriser une séquence de gestes sportifs/morphocinèses. La difficulté de la tâche, elle, variait. Pour simplifier ou complexifier le niveau de difficulté de la tâche, les séquences de gestes sportifs/morphocinèses étaient ou n'étaient pas appauvries en informations visuelles. Dans la condition de mémorisation de séquences de vidéos «classiques», les séquences étaient intactes alors que dans la condition de mémorisation de séquences animées de points lumineux, les séquences ne contenaient pas d'informations visuelles telles que les couleurs, les formes, et les contours des mouvements.

Deuxièmement, dans la présente étude, les sujets savaient quel type de séquence serait présenté lors de la tâche de reconnaissance. S'ils observaient une séquence de vidéo «classique» lors de la phase 2 (i.e., phase d'observation), ils savaient que dans la phase 4 (i.e., phase de reconnaissance) une séquence de vidéo «classique» serait présentée. Il en était de même pour la séquence animée de points lumineux. Cela peut laisser supposer que les sujets anticipaient la tâche de reconnaissance. Ils avaient des attentes sur sa difficulté perceptive. C'est pourquoi, lors de la condition de séquences animées de points lumineux, des valeurs de connectivité fonctionnelle plus élevées étaient décelées. Cette augmentation de connectivité fonctionnelle pourrait refléter une plus grande demande cognitive, une plus grande demande attentionnelle. Ces demandes auraient un coût qui se traduirait par une sollicitation neuronale supplémentaire. Cette suggestion corrobore les dires des sujets qui ont perçu l'analyse et la reconnaissance des séquences animées de points lumineux plus difficile que la reconnaissance des séquences de vidéos «classiques.» Ils ont déclaré être plus concentrés et plus attentifs sur les détails pendant la condition de mémorisation de séquences animées de points lumineux. Cette seconde explication va dans le sens des résultats trouvés par Ress et al. (2000), Lepsien et al. (2011), et Offen et al. (2009). Ress et al. (2000) ont montré que plus la tâche était difficile, plus l'activité corticale préparatoire augmentait. Dans le même ordre d'idées, Lepsien et al. (2011) et Offen et al. (2009) ont déclaré que l'activité du cortex visuel, lors de la phase de rétention, s'intensifiait en fonction de la difficulté perçue de la tâche de reconnaissance.

La présente étude ne permet pas de privilégier une explication plus qu'une autre. Des recherches additionnelles seraient nécessaires pour apporter des éléments de réponse.

6.2.2.2 Zone temporale gauche. La ou les raisons pour laquelle (lesquelles) la connectivité fonctionnelle est moins élevée au sein de la zone temporale gauche lors de la mémorisation de séquences animées de points lumineux n'est (ne sont) pas aisée(s) à expliquer. Il peut être avancé que cette zone reflèterait indirectement l'activité de l'aire de Wernicke, une aire présente dans l'hémisphère gauche et reconnue pour être impliquée dans le stockage phonologique (Paulesu et al., 1993). Nous pouvons spéculer que la quantité d'informations stockées lors de la mémorisation de séquences de vidéos «classiques» est plus importante que lors de la mémorisation de séquences animées de points lumineux. Contrairement aux vidéos «classiques», les séquences animées de points lumineux sont dépourvues d'informations de formes, de couleurs. Lors de la mémorisation de séquences de

points lumineux, les sujets auraient peut être encodés verbalement et stockés dans l'aire de Wernicke, en plus des informations cinématiques, des informations de formes, de couleurs. Ceci aurait, peut être, nécessité la mobilisation de ressources corticales additionnelles qui aurait conduit à une connectivité fonctionnelle plus importante.

7. CONCLUSION

En conclusion, cette étude est caractérisée par un certain nombre de forces : (i) l'association de données quantitatives (i.e., données EEG) avec des données qualitatives (i.e., entretiens d'explicitations), (ii) le but de l'étude, qui à notre connaissance, n'a jamais été investigué.

Les résultats de cette recherche auront permis d'enrichir le corpus de connaissances sur les mécanismes de la mémoire de travail. Premièrement, les résultats qualitatifs ont indiqué que les sujets, quelque soit le contexte, avaient utilisé les mêmes stratégies de mémorisation (i.e., répétition subvocale, association répétition sub-vocale & imagerie mentale, aucune stratégie). L'emploi de ces diverses stratégies corrobore le modèle de Baddeley (1986, 2000, 2010) sur la mémoire de travail. Deuxièmement, les résultats ont décelé une connectivité fonctionnelle plus élevée lors de la mémorisation des séquences animées de points lumineux. Une première explication pourrait être la nécessité d'effectuer une manipulation mentale pour retenir les séquences animées de points lumineux ce qui solliciterait un coût. Une seconde explication pourrait refléter l'anticipation par les sujets de la difficulté perceptuelle attendue de la tâche de reconnaissance à réaliser. Malheureusement, la présente étude ne permet pas de privilégier l'une ou l'autre des deux explications et des investigations complémentaires mériteraient d'être menées.

8. REFERENCES

- Altamura, M., Goldberg, T.E., Elvevag, B., Holroyd, T., Carver, F.W., Weinberger, D.R., Coppola, R. (2010). Prefrontal cortex modulation during anticipation of working memory demands as revealed by magnetoencephalography. *International Journal of Biomedical Imaging*, 10 pages. Doi: 10.1155/2010/840416.
- Baddeley, A.D. (1986). *Working memory*. Oxford: University Press.
- Baddeley, A.D. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 417-423.
- Baddeley, A.D. (2010). *Working memory thought, and action*. Oxford: Oxford University Press.
- Baddeley, A.D., & Hitch, G. (1974). Working memory. In G.H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (pp. 47–89). New York: Academic Press.
- Barch, D.M., Braver, T.S., Nystrom, L.E., Forman, S.D., Noll, D.C., & Cohen, J.D. (1997). Dissociating working memory from task difficulty in human prefrontal cortex. *Neuropsychologia*, 35, 1373-1380.
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 57, 289-300.
- Burgess, N., & Hitch, G.J. (1999). Memory for serial order: A network model of the phonological loop and its timing. *Psychological Review*, 106, 551-581.
- Cadopi, M. (1994). Sportif et danseur : représentations pour l'action chez de jeunes pratiquants. *Enfance*, 2/3, 247-263.
- Calmels, C., Foutren, M., & Stam, C.J. (2011). Influences of instructions and expertise on the mechanisms involved during a working memory task. *Journal of Psychology*. Doi: 10.1027/0269-8803/a000046.
- Courtney, S. M., Ungerleider, L. G., Keil, K., & Haxby, J.V. (1997). Transient and sustained activity in a distributed neural system for human working memory. *Nature*, 386, 608-611.
- Curtis, C.E., Rao, V.Y., & d'Esposito, M. (2004). Maintenance of spatial and motor codes during oculomotor delayed response tasks. *Journal of Neuroscience*, 24, 3944-3952.

- Druzgal, T.J., & d'Esposito, M. (2003). Dissecting contributions of prefrontal cortex and fusiform face area to face working memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *15*, 771-784.
- Fiehler, K., Burke, M., Engel, A., Bien, S., & Rosler, F. (2008). Kinesthetic working memory and action control within the dorsal stream. *Cerebral Cortex*, *18*, 243-253.
- Henson, R.N.A. (2001). Neuronal working memory: applications of the working memory model to neuropsychology and neuroimaging. In Andrade, J. (Ed), *Working memory: a work in progress* (pp. 151-173). London: Routledge.
- Hwang, G., Jacobs, J., Geller, A., Danker, J., Sekuler, R., Kahana, M.J. (2005). EEG correlates of verbal and nonverbal working memory. *Behavioral and Brain Functions*, *1*, 20. doi: 10.1186/1744-9081-1-20.
- Keil, D., Holmes, P., Bennett, S., Davids, K., & Smith, N. (2000). Theory and practice in sport psychology and motor behaviour needs to be constrained by modeling of brain and behaviour. *Journal of Sports Sciences*, *18*, 433-443.
- Leiberg, S., Lutzenberger, W., & Kaiser, J. (2006). Effects of memory on cortical oscillatory activity during auditory pattern working memory. *Brain Research*, *1120*, 131-140.
- Lepsien J., Thornton, I., & Nobre, A. (2011). Modulation of working-memory maintenance by directed attention. *Neuropsychologia*, *49*, 1569-1577.
- Levy, R., & Goldman-Rakic, P.S. (2000). Segregation of working memory functions within the dorsolateral prefrontal cortex. *Experimental Brain Research*, *133*, 23-32.
- Long, B.C., & Van Stavel, R. (1995). Effects of exercise training on anxiety: A meta-analysis. *Journal of Applied Sport Psychology*, *7*, 167-189.
- Nunez, A., Amzica, F., & Steriade, M. (1992). Intrinsic and synaptically generated delta (1–4 Hz) rhythms in dorsal lateral geniculate neurons and their modulation by light-induced fast (30–70 Hz) events. *Neuroscience*, *51*, 269–284.
- Nunez, P. L., Srinivasan, R., Westdorp, A. F., Wijesinghe, R. S, Tucker, D. M., Silberstein, R. B., & Cadusch, P. J. (1997). EEG coherency I: statistics, reference electrode, volume conduction, Laplacians, cortical imaging, and interpretation at multiple scales. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *103*, 499-515.
- Nuwer, M. R, Lehmann, F. L., da Silva, D., Matsuoka, S., Sutherling, W., & Vibert, J. F. (1999). IFCN guidelines for topographic and frequency analysis of EEGs and EPs. The International Federation of Clinical Neurophysiology. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *52*, 15-20.

- Offen, S., Schluppeck, D., & Heeger, D.J. (2009). The role of early visual cortex in visual short-term memory and visual attention. *Vision Research*, *49*, 1352-1362.
- Palmer, C. (1997). Music performance. *Annual Review of Psychology*, *48*, 115-138.
- Passingham, D., & Sakai, K. (2004). The prefrontal cortex and working memory: physiology and brain imaging. *Current Opinion in Neurobiology*, *14*, 163-168.
- Paulesu, E., & Frith, C.D., & Frackowiak, R.S. (1993). The neural correlates of the verbal component of working memory. *Nature*, *362*, 342-345.
- Pesonen, M., Hamalainen, H., & Krause, C.M. (2007). Brain oscillatory 4-30 Hz responses during a visual n-back memory task with varying memory load. *Brain Research*, *1138*, 171-177.
- Pochon, J.B., Levy, R., Poline, J.B., Crozier, S., L  h  ricy, 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. *Cerebral 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. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *12*, 2-14.vc
- Ress, D., Backus, B.T., & Heeger, D.J. (2000). Activity in primary visual cortex predicts performance in a visual detection task. *Nature Neuroscience*, *3*, 940-945.
- Ranganath, C., DeGustis, J., & d'Esposito, M. (2004). Category-specific modulation of inferior temporal activity during working memory encoding and maintenance. *Cognitive Brain Research*, *20*, 37-45.
- Repovs, G., & Baddeley, A. (2006). The multi-component model of working memory: explorations in experimental cognitive psychology. *Neuroscience*, *139*, 5-21.
- Sakai, K., Rowe, J.B., & Passingham, R.E. (2002). Active maintenance in prefrontal area 46 creates distractor-resistant memory. *Nature Neuroscience*, *5*, 479-484.
- Sakai, K., & Passingham, R.E. (2006). Prefrontal set activity predicts rule-specific neural activity during subsequent cognitive performance. *Journal of Neuroscience*, *26*, 1211-1218.
- Sarthein, J., Petsche, H., Rappelsberger, P., Shaw, G.L., & Von Stein, A. (1998). Synchronization between prefrontal and posterior association cortex during human working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 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. *Human Brain Mapping, 26*, 148-157.
- Smith, E. J., Balogh, A., Burton, M.E., Erdos, G., & Forsyth, R.J. (1995). Results of the Ulysses fast latitude scan: Magnetic field observations. *Geophysical Research Letters, 22*, 3325.
- Stam, C.J., van Cappellen van Walsum, A.M., & Micheloyannis, S. (2002). Variability of EEG synchronization during a working memory task in healthy subjects. *International Journal of Psychophysiology, 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
- Stam, C. J., & de Bruin, E. A. (2004). Scale-free dynamics of global functional connectivity in the human brain. *Human Brain Mapping, 22*, 97-109.
- Stam, C.J., Nolte, G., & Daffertshofer, A. (2007). Phase lag index: assessment of functional connectivity from multi channel EEG and MEG with diminished bias from common sources. *Human Brain Mapping, 28*, 1178-1193.
- Tallon-Baudry, C., Bertrand, O., Peronnet, F., & Pernier, J. (1998). Induced γ -band activity during the delay of a visual short-term memory task in humans. *The Journal of Neuroscience, 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 Neuroscience, 16*, 449-459.
- Tallon-Baudry, C., Bertrand, O., & Fischer, C. (2001). Oscillatory synchrony between human extrastriate areas during visual short-term memory maintenance. *The Journal of Neuroscience, 21*, 1-5.
- Ungerleider, L.G., Courtney, S.M., & Haxby, J.V. (1998). A Neural System for Human Visual Working Memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 95*, 883-890.
- Varela, F., & Shear, J. (1999). *The view from within. First-person approaches to the study of consciousness*. London: Edition Imprint academic.
- Vermersch, P. (2003). *L'entretien d'explicitation*. Paris : Edition ESF.
- Wilson, M., & Emmorey, M. (1997). A visuospatial « phonological loop » in working memory: evidence from american sign language. *Memory & Cognition, 25*, 313-320.

Wolters, G., & Raffone, A. (2007). Coherence and recurrency: maintenance, control and integration in working memory. *Cognitive Processing*, 9, 1-17.

9. QUELQUES PERSPECTIVES D'APPLICATIONS

Ce projet s'est inscrit dans l'Axe 1 Thème 1 du projet scientifique du Service Recherche de l'INSEP qui a été approuvé à l'unanimité lors de la séance du Conseil Scientifique, et Médical et de Formation qui s'est tenue le 19 mars 2012. Cet axe intitulé «complexité de la performance de haut niveau : contexte, temporalité, ressources, et contraintes» caractérise de manière fine et complète la performance de haut niveau en intégrant la complexité de celle-ci (Point d'étape sur la création d'un laboratoire transdisciplinaire et échancier relatif à la démarche d'habilitation par l'AERES, p.4). Le thème 1, lui, se centre, plus particulièrement, sur la compréhension des processus afin de caractériser la performance sportive, de mieux la comprendre, et ainsi de mieux l'appréhender.

Ainsi, le but du présent projet était d'améliorer notre connaissance des mécanismes impliqués lors de la mémorisation de mouvements sportifs. Il a été mis en évidence que l'environnement visuel influait sur les activités électro-corticales lors de tâches de mémorisation. Plus précisément, dans la bande de fréquence bêta, une connectivité fonctionnelle plus importante a été relevée au sein des zones frontale et temporale droite lors de la mémorisation de mouvements sportifs familiers enchâssés dans des environnements visuels inhabituels et minimalistes comparé à des environnements habituels, écologiques. L'inverse a été montré au sein de la zone temporale gauche. Il a également été mis en évidence, lors d'entretiens, que les sportifs utilisaient des stratégies de rétention similaires quel que soit l'environnement visuel considéré : répétition sub-vocale, répétition sub-vocale associée à de l'imagerie, aucune stratégie.

Au regard des stratégies de rétention ayant été révélées dans le cadre de cette étude, il serait judicieux de les caractériser, de les développer, de les faire évoluer tout en prenant en considération la singularité du sportif de haut niveau dans le but d'optimiser sa performance sportive. Quelques interrogations nous paraissent nécessaires.

1. L'imagerie est-elle de nature externe, interne? Quel est le contenu de l'image mentale? Quelles modalités sensorielles sont impliquées lors de l'imagerie? Les modalités auditive, kinesthésique, olfactive etc...sont-elles intégrées dans ce processus? La simulation mentale est-elle réalisée une ou plusieurs fois? Quelles sont les

caractéristiques cinématiques de l'image mentale? Le sportif simule-t-il à vitesse réelle, en accéléré ou au ralenti?

2. Quelle est la nature de la répétition sub-vocale? Est-elle de nature techniciste ou plutôt motivationnelle? Quelle est sa fréquence d'utilisation? Quel registre de vocabulaire est employé? La répétition sub-vocale est-elle réalisée à voix haute ou intérieurement?
3. Quelles sont les caractéristiques de l'association «répétition sub-vocale et imagerie»? Le sportif utilise-t-il une imagerie externe couplée à une répétition sub-vocale de nature techniciste ou plutôt une imagerie interne kinesthésique associée à une répétition sub-vocale motivationnelle etc...?
4. Le sportif a-t-il conscience d'utiliser ces stratégies? Est-il aisé de verbaliser ou d'expliquer les stratégies de rétention que l'on emploie?
5. Ces stratégies se développent-elles par le biais d'expériences naturelles ou suite à des interventions structurées? Comment optimiser ce développement? Quelles stratégies sont les plus efficaces pour l'obtention d'une performance optimale?

Quelques éléments de réponses peuvent être apportés suite au projet de recherche n°03-009 réalisé en collaboration avec la Fédération Française de Gymnastique (2005) et financé par le Ministère de la Jeunesse et des Sports et de la Vie Associative. Calmels et al. (2005) ont montré que les gymnastes féminines du pôle France de gymnastique de l'INSEP utilisaient quatre stratégies de rétention pour traiter les informations prélevées lors de l'observation de leur prestation : la répétition sub-vocale, l'imagerie associée à la répétition sub-vocale, l'écoute du feedback de l'entraîneur, et l'observation d'autrui (voir Figure ci-dessous et rapport n°03-009).

Résultats (Stratégies de Rétention)		
<i>↳ Après l'observation sur l'écran</i>		
<i><u>Retour au bac à magnésie</u></i>	<i><u>Attente au bac à magnésie</u></i>	<i><u>Positionnement sur l'après</u></i>
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Utiliser la répétition sub-vocale ✓ Utiliser l'imagerie associée à la répétition sub-vocale ✓ Utiliser l'imagerie ✓ Écouter le feed-back de l'entraîneur 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Observer autrui ✓ Utiliser la répétition sub-vocale ✓ Utiliser l'imagerie ✓ Écouter le feed-back de l'entraîneur ✓ Utiliser l'imagerie associée à la répétition sub-vocale 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Utiliser la répétition sub-vocale ✓ Utiliser l'imagerie ✓ Utiliser l'imagerie associée à la répétition sub-vocale ✓ Observer autrui

Pour conclure, nous espérons que ce rapport permettra aux entraîneurs, éducateurs, professeurs, dans un premier temps, d'engager une réflexion sur leur pratique et dans un second temps de mettre en place des procédés afin d'optimiser la performance des athlètes dont ils ont la charge.

ANNEXE 1

MODELES THEORIQUES DE LA MEMOIRE

1- Modèle de la mémoire de travail de Baddeley (1986, 1995, 2000, 2003, 2010) & Baddeley & Hitch (1974)

Le modèle de la mémoire de travail de Baddeley (1986, 1995, 2000, 2003), modèle clé dans la psychologie cognitive, se compose d'un administrateur central ou exécutif central et de trois «sous-système esclaves» : la boucle phonologique, le calepin visuo-spatial, et le tampon épisodique (voir Figure 1). Ces sous-systèmes sont qualifiés de «tampons» dans la mesure où ils constituent une interface avec la Mémoire à Long Terme (MLT).

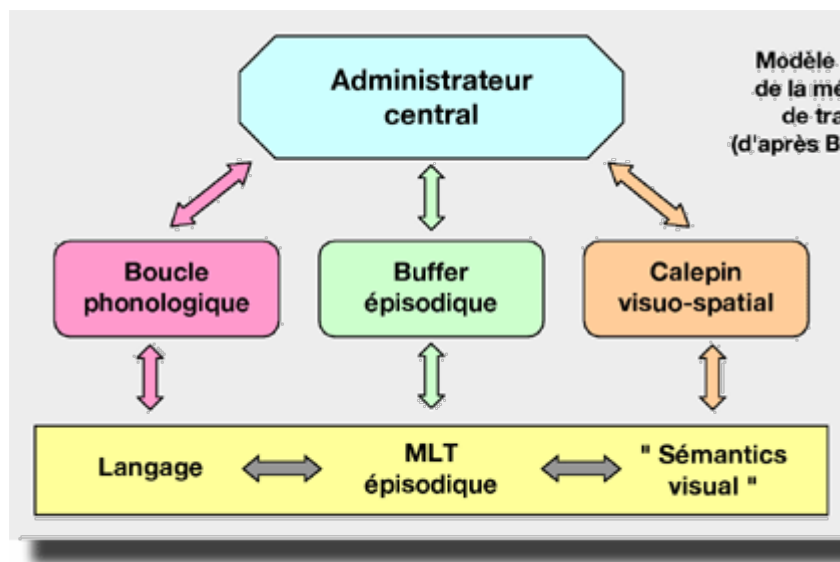


Figure 1 : Représentation simplifiée du modèle de la mémoire de travail de Baddeley (2000) (tiré de <http://www.vetopsy.fr>)

L'administrateur central ou l'exécutif central a plusieurs rôles. Il gère le fonctionnement des systèmes esclaves et leur coordination. Il permet le transfert des informations de la mémoire de travail vers la MLT et également la réalisation simultanée de deux tâches, l'une nécessitant un stockage et l'autre requérant un traitement.

Le premier sous-système, la boucle phonologique est un sous système ayant pour tâche le traitement de la parole et des informations verbales entendues ou lues. Ce système est sollicité, par exemple, lorsqu'une personne recherche un numéro de téléphone et le répète mentalement tout en le composant. Cette boucle se divise en deux composantes : une unité de stockage phonologique et un contrôle articulatoire. L'unité de stockage est un système de stockage passif de capacité limitée permettant de maintenir en mémoire des traces mnésiques auditives. Ces traces auditives sont réactivées, avant qu'elles ne se dissipent, via des mécanismes de répétitions (i.e., contrôle articulatoire ou boucle articulatoire) (voir Figure 2).

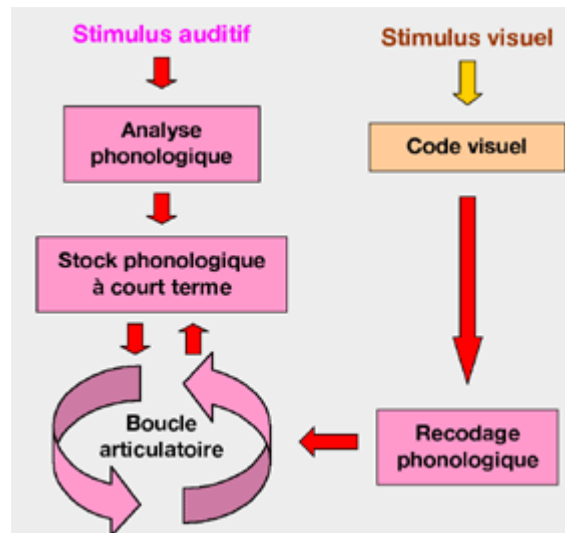


Figure 2 : Représentation de la boucle phonologique (tiré de <http://www.vetopsy.fr>)

Le contrôle articulaire assure également le recodage phonologique des informations visuelles afin qu'elles puissent intégrer le stock phonologique grâce à des répétitions mentales (i.e., contrôle articulaire ou boucle articulaire) (voir Figure 2).

Le deuxième sous-système, le calepin visuo-spatial permet de maintenir et de manipuler des informations visuelles et spatiales. Il se divise en deux composantes : le cache interne et le scribe interne. Le cache interne a pour fonction le stockage passif des informations visuelles tandis que le scribe interne permet le rafraîchissement et la manipulation de ces informations (Loggie, 1995).

Le troisième sous-système, le tampon épisodique a été introduit tardivement dans ce modèle (2000). Il intègre les informations auditives, visuelles et spatiales et probablement d'autres formes d'informations (i.e., informations sémantiques et musicales) sous une forme de représentation unitaire et épisodique. Ce sous système interagit étroitement avec la mémoire épisodique à long terme et disposerait d'une capacité de stockage temporaire plus imposante que la boucle phonologique et le calepin visuo-spatial du fait de sa capacité à organiser les informations sous forme de «chunks».

Le passage de la mémoire de travail à la MLT n'est pas systématique. Il a lieu soit si l'encodage est approfondi, soit si l'information est répétée mentalement ou encore si l'information revêt une signification particulière pour le sujet ou si elle est perçue comme un événement émotionnel fort chez ce dernier.

2- La Mémoire à Long Terme (MLT) (adapté de Squire & Zola, 1996)

La MLT se compose de la mémoire explicite ou déclarative et de la mémoire implicite ou non déclarative (Voir Figure 3).

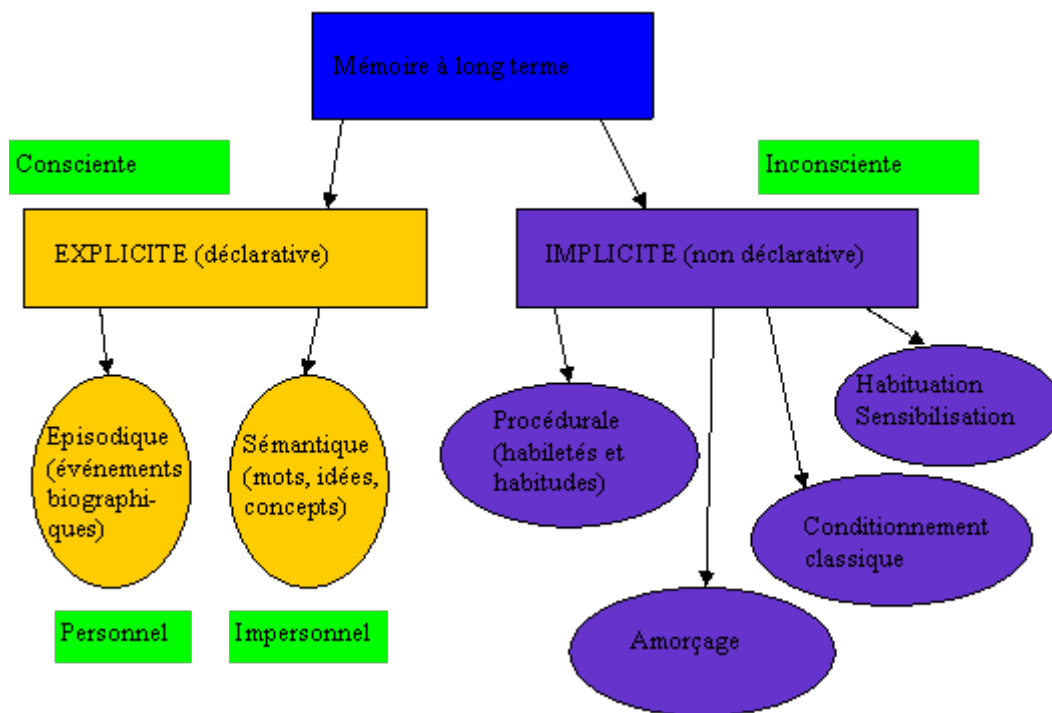


Figure 3 : Représentation de la MLT adapté de Squire et Zola (1996)

La mémoire explicite ou déclarative est consciente. Elle est activée de façon volontaire. Les informations stockées dans cette mémoire peuvent être explicitées à l'oral ou à l'écrit. La mémoire explicite se divise en deux composantes (Tulving, 1972) : la mémoire épisodique et la mémoire sémantique. La mémoire épisodique appelée aussi «autobiographique» correspond aux souvenirs propres d'un individu qui ont eu lieu à un endroit et à un instant donné. L'individu est acteur des événements mémorisés et par conséquent il mémorise certes l'événement mais aussi le contexte particulier lié à cet événement. La mémoire sémantique, elle, permet à l'individu de stocker sa connaissance du monde. Elle correspond donc à des généralités, comme par exemple, le nom des capitales, les coutumes sociales, la fonction des choses, leur couleur. Il s'agit d'une mémoire de référence renfermant des concepts et des règles qui permettent à l'individu de créer des représentations mentales du monde sans sa perception.

La mémoire implicite est dite non-déclarative. L'individu ne peut pas verbaliser les informations stockées dans cette mémoire. Celle-ci comprend 4 composantes : la mémoire procédurale, l'amorçage ou priming, le conditionnement classique, et l'habituation ou la sensibilisation.

La mémoire procédurale se rapporte aux habiletés et performances motrices. Son rôle est d'effectuer les tâches quotidiennes par la création d'automatismes.

L'amorçage ou priming est un paradigme expérimental où un stimulus est présenté préalablement (amorçage) dans le but d'avoir un effet sur le traitement d'un autre stimulus (cible).

Le conditionnement classique, aussi appelé conditionnement pavlovien ou conditionnement répondant, est basé sur la construction d'un lien entre un stimulus issu de l'environnement et une réponse automatique de l'organisme.

L'habituation est une forme d'apprentissage. C'est le fait, suite à l'exposition répétée d'un stimulus, d'être moins sensible à celui-ci. La sensibilisation, elle, n'est pas réellement un apprentissage et peut être perçue comme le processus inverse : plus un stimulus est présenté à un individu, plus ce dernier y sera réactif.

Références

- Atkinson, R.C. & Shiffrin, R.M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In Spence, K.W., Spence, J.T., *The psychology of learning and motivation* (pp.89-195). New York: Academic Press.
- Baddeley, A.D. (1986). *Working memory*. Oxford: University Press.
- Baddeley, A. (1995). Working memory. In M.S. Gazzaniga (Ed.), *The cognitive neurosciences* (pp. 755-764). Cambridge, MA: MIT Press.
- Baddeley, A.D. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 417-423.
- Baddeley, A. (2002). Working memory. *Science*, 255, 556-559.
- Baddeley A (2003). Working memory: looking back and looking forward. *Nature Reviews Neuroscience*, 4, 829-839. Doi:10.1038/nrn1201.
- Baddeley, A.D., & Hitch, G. (1974). Working memory. In G.H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (pp.47-89). New York: Academic Press.
- Craik, F. I. M., & Lockhart, R. S. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 11, 671-684.
- Gazzaniga, M.S., Ivry, R.B., & Mangun, G.R. (2001). *Les neurosciences cognitives : la biologie de l'esprit* (pp.251). Bruxelles : De Boeck Université.
- Glanzer, M., & Cunitz, A. (1966). Two storage mechanisms in free recall. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 5, 351-360.
- Logie, R.H. (1995). *Visual working memory*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.
- Postman, L., & Phillips, P. (1965). Short-term temporal changes in free recall. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 17, 132-138.
- Shallice, T., & Warrington, E. (1970). Independent functioning of verbal memory stores: A neuropsychological study. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 22, 261-273.
- Squire, L.R., & Zola, S.M. (1996). Structure and function of declarative and non declarative memory systems. *Proceedings of the National Academy of Science, USA*, 93, 13515-13522.
- Tulving, E. (1972). Episodic and semantic memory. In, *Organization of Memory*. New York: Academic Press.

ANNEXE 2

+ Communication réalisée lors du 18ème Congrès International de “Human Brain Mapping” (10-14 juin 2012, Pékin, Chine)

+ Article sous presse dans Neuroscience

Calmels, C., Foutren, M., & Stam, C.J. (in press). Beta EEG functional connectivity modulation during the maintenance of motion information in working memory: Importance of the familiarity of the visual context. *Neuroscience* (IF = 3.215).

Influence of the Visual Context during the Maintenance of Motion Information in Working Memory

Claire Calmels¹, Marion Foutren^{1,2}, & Cornelis Stam³

¹Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance, Paris, France

²Université Paris-Est, Marne la Vallée, France

³Department of Clinical Neurophysiology, VU University Medical Centre, Amsterdam, The Netherlands

Corresponding author: claire.calmels@insep.fr



Background and Objective

Mechanisms underlying the active maintenance of information in working memory have been extensively investigated in the scientific literature and many research groups have used the multiple-component model of working memory developed by Baddeley and colleagues (1974, 1986, 2000, 2010). In previous studies, dynamic visual displays, such as biological motions, have scarcely been employed (Calmels et al., 2011; Fiehler et al., 2008).

✧ The aim of this study was to consider whether the mechanisms at play in maintaining in working memory familiar biological motion information stemming from a minimalist display were similar to those involved when information emanates from a realistic, ecological display.

Methods

SUBJECTS

- 12 French female expert gymnasts (mean age = 21, SD = 4.1)
- able to perform the movements employed in the study (motor familiarity)

STIMULI

- 30 direct connections (series) of four acrobatic movements
- Two kinds of stimuli presented under different displays: a video motion display (i.e., realistic display) and a point-light motion display (i.e., minimalist display) (see Figure 1)

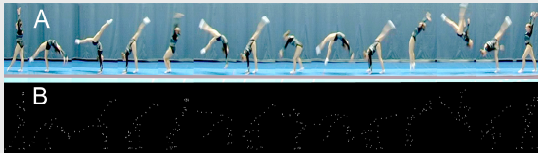


Figure 1. Stimuli used in the experiment. In (A), frames from video motion display and in (B), frames from point-light motion display

EXPERIMENTAL PROCEDURE

- 2 conditions: Video motion maintenance condition & Point-light motion maintenance condition
- 30 trials / maintenance condition
- Schema for one trial according to maintenance conditions (see Figure 2)
- 4 blocks of 15 trials / 1 block: 8 min 45 / 5 min of rest between each block

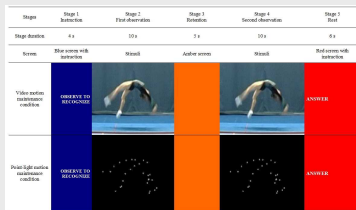


Figure 2. Schema for one trial according to maintenance conditions

DATA ACQUISITION AND PROCESSING

EEG Recording & Processing

- 64 Neuroelectrodes (Quick-Cap, Neuromedical supplies, Charlotte, NC, USA); reference electrodes: mastoids; VEOG; HEOG
- Sampling frequency: 500 Hz. Down sampled to 250 Hz
- EEG data reformatted in a common average montage, ocular artifact correction
- Third stage considered = Retention stage (15 – 19 s)
- Frequency bands: 4-8 Hz, 8-10 Hz, 10-13 Hz, 13-20 Hz, and 20-30 Hz
- Functional Connectivity via Phase Lag Index (PLI) (Stam et al., 2007)
- Six areas of interest (see Figure 3)

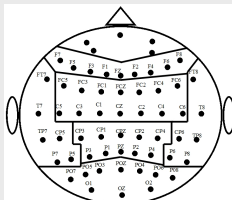


Figure 3. Six areas of interest

INTERVIEW (Vermech, 2003)

To identify the strategies used during the retention stage

Results

EEG DATA

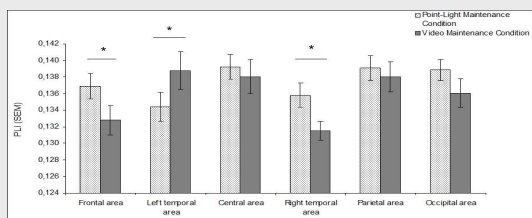


Figure 4. PLI values in the 13-20 Hz frequency band under the point-light and video motion maintenance conditions within the frontal, temporal, central, parietal, and occipital areas. Asterisks (*) indicate statistically significant difference (* $p < .035$)

QUALITATIVE DATA

	Point-Light Maintenance Condition	Video Maintenance Condition
Subvocal Rehearsal	7	6
Mental Imagery + Subvocal Rehearsal	4	5
No Strategies	1	1

Table 1. Strategies used by the subjects during the retention stage under the point-light and video maintenance conditions

Discussion

Greater functional connectivity within the frontal and right temporal areas under the point-light condition / video condition

- The cost of additional resources due to mental rearrangement performed by the subjects. The subjects reported coding the visual information presented through minimalist displays into a mental representation including structural and contextual information (colours, forms, and contours) which were lacking in these displays. When exposed to video displays, this mental rearrangement was needless.
- The expected perceptual difficulty of the upcoming task to perform. The subjects may anticipate the forthcoming task. This is in line with the work by Lepsien et al. (2011) and Offen et al. (2009)

Greater functional connectivity within the left temporal area under the video condition / point-light condition

- The activity of Wernicke's area considered being devoted to phonological storage (Paulesu et al., 1993). It can be speculated that under the video maintenance condition, the subjects may have verbally coded and stored in Wernicke's area, additionally to motion information, information related to colour and form.

Main References

- Baddeley, A.D. (2010). Working memory thought, and action. University Press: Oxford.
- Baddeley, A.D., Hitch, G. (1974). Working memory. In: The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory, (Bower GH, ed), pp 47-89. New York: Academic Press.
- Lepsien, J., Thornton, J., Nobre, A. (2011). 'Modulation of working-memory maintenance by directed attention'. *Neuropsychologia*, vol. 49, pp.1569-1577.
- Offen, S., Schuppeck, D., Heeger, D.J. (2009). 'The role of early visual cortex in visual short-term memory and visual attention'. *Vision Research*, vol. 49, pp. 1352-1362.
- Stam, C.J., Nolle, G., Daffertshofer, A. (2007). 'Phase lag index: assessment of functional connectivity from multi channel EEG and MEG with diminished bias from common sources'. *Human Brain Mapping*, vol. 28, pp.1178-1193.

Acknowledgment: This work was supported by a grant from the French Ministry of Health, Youth and Sports

Please cite this article in press as: Calmels C et al. Beta functional connectivity modulation during the maintenance of motion information in working memory: Importance of the familiarity of the visual context. *Neuroscience* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroscience.2012.03.045>

Neuroscience xxx (2012) xxx–xxx

BETA FUNCTIONAL CONNECTIVITY MODULATION DURING THE MAINTENANCE OF MOTION INFORMATION IN WORKING MEMORY: IMPORTANCE OF THE FAMILIARITY OF THE VISUAL CONTEXT

Q1 C. CALMELS,^{a*} M. FOUTREN^{a,b} AND C. J. STAM^c

^aINSEP, Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance, Paris, France

^bUniversité Paris-Est Marne la Vallée, France

^cDepartment of Clinical Neurophysiology, VU University Medical Centre, Amsterdam, The Netherlands

Abstract—The purpose of this study was to examine whether mechanisms, involved during the maintenance of familiar movement information in memory, were influenced by the degree of familiarity of the display in which the movements were embedded. Twelve gymnasts who possessed high visual and motor familiarity with the movements employed in this study, were recruited. They were invited to retain for a short period of time familiar movements viewed previously and presented under different displays with the aim of recognizing them at a later stage. The first display was a realistic, familiar display which presented videos of movements. The second display was an unfamiliar impoverished display never experienced in every day life which showed point-light movements. Activity during the maintenance period was considered in five frequency bands (4–8 Hz, 8–10 Hz, 10–13 Hz, 13–20 Hz, 20–30 Hz) using a non-linear measure of functional connectivity. The results in the 13–20 Hz frequency band showed that functional connectivity was greater within the frontal and right temporal areas during the unfamiliar display (i.e., point-light maintenance condition) compared to the familiar display (i.e., video maintenance condition). Differences in functional connectivity between the two maintenance conditions in the beta frequency band are mainly discussed in the light of the process of anticipation. Subjects' perception of the expected difficulty of the upcoming recognition task is discussed. © 2012 Published by Elsevier Ltd on behalf of IBRO.

Key words: working memory maintenance, Sternberg task, biological movement, functional connectivity, phase lag index, point-light display.

*Corresponding author. Address: Mission Recherche, Institut National du Sport de l'Expertise et de la Performance, 11 Avenue du Tremblay, 75012 Paris, France. Tel: +33-(1)-41-74-43-73; fax: +33-(1)-41-74-45-35.

E-mail address: claire.calmels@insep.fr (C. Calmels).

Abbreviations: EEG, electroencephalography; fMRI, functional magnetic resonance imaging; MEG, magnetoencephalography; PLI, phase lag index; SL, synchronization likelihood.

0306-4522/12 \$ - see front matter © 2012 Published by Elsevier Ltd on behalf of IBRO.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroscience.2012.03.045>

INTRODUCTION

In everyday life, humans have to actively hold information active in memory for short periods of time in order to subsequently perform motor or cognitive tasks successfully.

Mechanisms underlying the active maintenance of information in working memory have been extensively investigated in the scientific literature and many research groups have used the multiple-component model of working memory developed by Baddeley and Hitch (1974) and Baddeley (1986, 2000, 2010) to direct their studies and support and explain findings. To examine these mechanisms, different techniques including functional magnetic resonance imaging (fMRI; Postle et al., 2000; Pochon et al., 2001; Sakai et al., 2002; Fiehler et al., 2008) or electroencephalography/magnetoencephalography (EEG; Sarthein et al., 1998; Tallon-Baudry et al., 1998, 1999; Stam et al., 2002; Hwang et al., 2005; Sauseng et al., 2005; MEG; Altamura et al., 2010) and different paradigms such as recall or Sternberg tasks (recall tasks; Sarthein et al., 1998; Stam et al., 2002; Sternberg tasks; Tallon-Baudry et al., 1998, 1999; Hwang et al., 2005; Sauseng et al., 2005; Altamura et al., 2010) have been employed. In all the aforementioned studies, the stimuli used only included still images (e.g., letters, digits, words, smooth shapes, pictures, matrixes containing coloured targets, and spatial locations). Dynamic displays, such as biological movements, have scarcely been employed in working memory studies.

To our knowledge, two studies have presented hand/finger movements to examine the mechanisms to hold movement information active in memory after a kinaesthetic stimulus presentation (Fiehler et al., 2008) and a visual stimulus presentation (Calmels et al., 2011). Using fMRI, Fiehler et al. (2008) examined the cortical regions involved when subjects kept in memory for short periods of time hand movement information in order to accomplish a recognition task at a later stage. In their study, movement information was exclusively kinaesthetic and visual input was systematically suppressed. Subjects were blindfolded and movement recognition was completed on a kinaesthetic basis. Results revealed that anterior intraparietal sulcus and adjacent areas were involved in the maintenance of kinaesthetic information. Calmels et al. (2011) investigated, via EEG, the functional connectivity among professional pianists and musically naïve subjects who were instructed to remember sequential finger movements viewed previously with the aim of either

Please cite this article in press as: Calmels C et al. Beta functional connectivity modulation during the maintenance of motion information in working memory: Importance of the familiarity of the visual context. *Neuroscience* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroscience.2012.03.045>

replicating them or recognizing them subsequently. The results showed that in the beta frequency band and in musically naïve subjects, functional connectivity was greater within the occipital, 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, under the condition for replica, functional connectivity in professional pianists was weaker in the central area compared to musically naïve subjects.

It would be of interest to consider the mechanisms of movement information maintenance in working memory after the presentation of visual dynamic stimuli in a Sternberg task. More specifically, the maintenance mechanisms enrolled in response to different visual stimuli depicting highly familiar biological movements warrant further attention since this topic has not been addressed in the literature. In the current study, different visual stimuli depicting familiar biological movements were presented. These stimuli were different with respect to their degree of familiarity. The first kind of visual stimulus was presented via videos of “real” movements and emanated from a realistic, ecological display. It contained large amounts of structural and contextual information (i.e., form, shape, colour, texture). The second one was devoid of this type of information and was displayed using the technique of point-light displays pioneered by Johansson (1973). This display was an unfamiliar impoverished display never experienced in every day life. Subjects were selected from among a population of expert female gymnasts who were visually and motorically highly familiarized with the movements employed in the experimental procedure. This recruitment procedure guaranteed that the factor which has been manipulated in the present study was the display (unfamiliar vs familiar). The investigation of cortical mechanisms, in particular levels of synchronization between different brain areas, was performed using the phase lag index (PLI). PLI is a marker of functional connectivity which is invariant against the presence of common sources (volume conduction and active reference electrodes) (Stam et al., 2007).

It was hypothesized that maintenance of familiar movement information in working memory was influenced by the degree of familiarity of the display in which this movement was embedded. Mechanisms to maintain temporarily in memory motion information presented via point-light displays may require a greater treatment cost, reflected by a greater functional connectivity, in comparison to motion information presented via videos of “real” motions. Extra processing may be required to process point-light displays since individuals are not used to experiencing these artificial and impoverished displays in the daily life. Functional connectivity differences are expected to occur in the beta frequency band since beta oscillations are recognized as being linked to the retention of information (Tallon-Baudry et al., 1998, 1999, 2001; Hwang et al., 2005; Leiberg et al., 2006; Pesonen et al., 2007; Altamura et al., 2010; Calmels et al., 2011). More specifically, beta activity is related to the activity of subvocal rehearsal during the maintenance of information in the working memory

(Hwang et al., 2005) but also to the process of (mental) imagery (Tallon-Baudry et al., 1998, 1999, 2001). It has also been demonstrated that beta rhythm is at play during imagery of motor activity. It is desynchronized over the sensorimotor cortical areas (Pfurtscheller and Neuper, 1997; Pfurtscheller et al., 1997; Neuper and Pfurtscheller, 1999; McFarland et al., 2000).

METHOD

Subjects

Fifteen French female expert gymnasts, who had normal vision and no past neurological or psychiatric history, participated voluntarily in the study. Subjects were not carrying any injury at the time of the study. Information on the aims of the investigation was not provided. To guarantee that the subjects possessed motor and visual familiarity of the movements employed in the study, they were invited to evaluate on a Likert-scale, graded from 0 to 10 (“0” never and “10” very often), how often they saw the movements and how often they performed the movements. Gymnasts who scored below “8” were discarded from the study. After assessment using the Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971), all subjects were classed as right handed. Participants gave their written informed consent. For subjects who were under the age of 18, parental or guardian consent was also obtained. Approval for the study was obtained by the local ethics committee (Comité de Protection des Personnes d’Île de France VI, CPP and the Agence Française de Sécurité Sanitaire des Produits de Santé, AFSSAPS, ID RCB: 2009-A00934-53).

Three subjects were additionally discarded from the study due to high electrode impedance values and noisy EEG waveforms. Thus, data from the twelve remaining subjects (mean age = 21, SD = 4.1) were considered.

Task and production of videos

An international female gymnast performed 30 direct series of four acrobatic movements. This gymnast did not participate in the present study. The movements were performed with or without flight phase in the forward, side-ward, or backward movement. The series were matched according to difficulty and were selected among a panel of 80 possible direct connections of four acrobatic movements. Connections considered as easy to remember (i.e., score assessment of 1, 2, or 3 on a 5 point-Likert scale by two national standard judges) were excluded.

The international gymnast was filmed in a gymnasium on the floor area performing the 30 direct connections. The gymnast performed all the connections at a similar angle relative to the camera. In the first case, a digital camera was used to record 30 ten second-colour videos. In the second case, 10 s point-light displays were generated for the same series using the optoelectronic Vicon 612 system. Eight infrared cameras (Charge Coupled Device) registered the spatiotemporal positions of 32 retroreflective markers at a sampling rate of 120 Hz. These were located at the conventional standardized marker set (Plug-In-Gait markers, Vicon Motion Systems). Two cate-

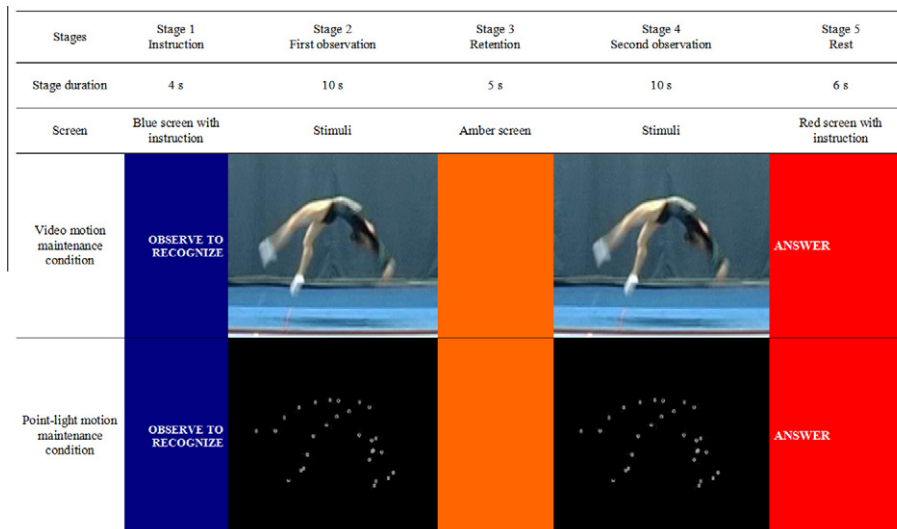


Fig. 1. Schema for one trial according to maintenance conditions used by Hars et al. (2011).

179 gories of stimuli were obtained. The first one took into account
180 the colour, shape, shading, and contours of the acrobatic movements
181 (i.e., video motion) while the second was greatly simplified and
182 characterized the movements by dots of light (i.e., point-light motion)
183 (see Fig. 1). The point-lights were displayed in a white against
184 black background.

216 maintenance condition, and (iii) a point-light motion maintenance
217 condition. EEG measures were recorded during all three
218 conditions.

219 *Control condition.* The control condition was always presented
220 first and each visualization lasted 60 s. In this condition, the
221 subjects observed passively an amber screen.

186 EXPERIMENTAL PROCEDURE

187 Q4 The experimental procedure comprised two parts: an EEG
188 recording and an interview. The first part of the experimental
189 procedure in the present study has been described in a previous
190 paper (Hars et al., 2011). More accurately, the current paper reports
191 additional analysis of EEG data collected previously. In the earlier
192 paper, the authors examined the cortical mechanisms during
193 observation whereas in the present paper, mechanisms after the
194 observation, namely during the retention stage, were investigated.
195 Because observation and retention are two different processes
196 which involve different cortical areas and oscillations, the areas
197 of interest and the frequency bands examined in the present and
198 the former study are different. Motor related areas, temporal
199 and occipito-parietal areas were considered in the earlier study
200 whereas frontal, temporal, central, parietal, and occipital areas
201 were investigated in the present paper. Theta and alpha
202 frequency bands were considered in the former study and beta
203 was investigated in the current paper. Moreover, here, computation
204 of functional connectivity via the PLI was more elaborated
205 compared to the computation employed in the former paper
206 (i.e., synchronization likelihood, SL). Indeed, PLI is less sensitive
207 to the influence of common sources (volume conduction and/or
208 active reference electrodes) than SL (Stam et al., 2007). To
209 sum up, the investigated mechanisms, areas of interest, frequency
210 bands, and calculation of functional connectivity were different
211 between the two studies.

222 *Video motion maintenance condition.* The video motion
223 maintenance condition comprised 30 individual trials each lasting
224 35 s. Each trial included five stages projected via a video display.
225 Three screen colours (blue, amber, and red¹) helped the subject
226 follow the procedure (see Fig. 1). In stage 1 (blue screen,
227 duration 4 s), the subject was instructed to observe a series of four
228 acrobatic movements with the aim of recognizing them subsequently.
229 In stage 2 (duration 10 s), the subject viewed the video motion
230 of the series of four acrobatic movements (i.e., cue stimulus).
231 After the video motion observation, the subject was asked to stay
232 focused for 5 s (stage 3, amber screen) before completing the
233 recognition task. In stage 4 (duration 10 s), a second video
234 motion of a series of four acrobatic movements (i.e., probe
235 stimulus) was presented and the subject had to decide whether this
236 series was similar or dissimilar to the one viewed in stage 2
237 (i.e., cue stimulus). Two series were defined as dissimilar when
238 there was one different acrobatic movement between the two
239 series. This difference occurred either in the middle or at the end
240 of the series. A total of 50% of the series were similar. Clenching
241 or not clenching of the fist by the subject was used to indicate the
242 response in stage 5 (red screen, 6 s). In this final stage, the
243 subject was encouraged to relax and to blink the eyes if necessary.

244 *Point-light motion maintenance condition.* In the point-light
245 motion maintenance condition, the 30 trials were performed in
246 a similar manner to those used in the video motion maintenance
247 condition. In contrast, stages 2 and 4 were modified. While the
248 subjects observed the same set of series of four acrobatic
249 movements displayed in the video motion maintenance condition,
250 the display under the point-light motion maintenance condition was
251 impoverished and characterized by dots of light (see Fig. 1). As
252 previously mentioned, 50% of the series were similar.

212 EEG recording

213 During the EEG recording, the subjects sat in a darkened room
214 with their pronated forearms lying on armrests. They were
215 examined in three conditions: (i) a control condition, (ii) a video motion

¹ For interpretation of colour in Fig. 1, the reader is referred to the web version of this article.

253 A photoresistive diode that responded to the screen colour
254 change was used to synchronize the EEG signal and the videos.
255 Before providing the subjects with the instructions related to the
256 experiment, the control condition was presented to them. This
257 was followed by an explanation of the experiment and a
258 10 min-period during which the subjects had an opportunity to
259 familiarize themselves with the tasks to be performed. The 60 trials
260 (30 trials for the video motion maintenance condition and 30
261 trials for the point-light motion maintenance condition) were ran-
262 domized and distributed at random in four 8 min 45 s blocks. Each
263 block was thus composed of 15 trials stemming from the two
264 maintenance conditions and separated by a five minute rest per-
265 iod. The experimenter monitored the correctness of the answers
266 provided in the two maintenance conditions for recognition. Incor-
267 rect answers were discarded.

268 Interview

269 After the EEG recordings, interviews (Vermersch, 2003) were
270 conducted to provide an occasion to study a combination of the
271 subjective experience of the subject with more objective results
272 emanating from scientific analyses. The interviews lasted from
273 10 to 15 min. The subjects were invited to identify the strategies
274 they had employed during the retention phase (i.e., stage 3).
275 They were also asked to assess, via a 10-point Likert scale
276 (“0” very difficult and “10” very easy), the difficulty to maintain
277 in memory, and recognize movements under a point-light and vi-
278 deo motion maintenance conditions.

279 Data acquisition and recording

280 Electrical brain activity was recorded using 64 electrodes
281 mounted in an elastic lycra cap (SynAmps2 64 channels Quick-
282 Cap, Neuromedical supplies, Charlotte, NC, USA) and placed
283 in accordance with the international 10-10 system (Nuwer
284 et al., 1999). Mastoids were used for the reference electrodes
285 and the ground electrode was located between FPZ and FZ. In
286 addition, electro-oculograms (EOG) were registered from the
287 canthi of both eyes (horizontal EOG) and the supra and infra or-
288 bital of the left eye (vertical EOG). Throughout the experimentation,
289 electrode impedance was kept homogeneously below 5 k Ω . Ampli-
290 fier bandwidth was set between 0.05 and 100 Hz. While the initial
291 sampling frequency was 500 Hz, data were downsampled to
292 250 Hz for further analysis. AD resolution was 24 bit.

293 Functional connectivity: PLI

294 Functional connectivity was assessed using the PLI (Stam et al.,
295 2007). Here, we followed the description provided in Douw et al.
296 (2010, p. 111): The PLI calculates synchronization between time
297 series by reflecting the consistency with which one signal is
298 phase leading or lagging with respect to another signal. The
299 PLI exploits the asymmetry of the distribution of instantaneous
300 phase differences between two signals. It assumes that the pres-
301 ence of a consistent, nonzero phase lag between two time series
302 cannot be explained by volume conduction alone. Thus, finding
303 true interactions instead of volume conduction effects is more
304 likely when using this method. The PLI ranges between 0 and
305 1, and a PLI of more than 0 indicates phase locking to a certain
306 extent, whereas a PLI of 0 indicates no coupling or coupling with
307 a phase difference centred around $0 \pm \pi$ radians. An index of the
308 asymmetry of the phase difference distribution can be obtained
309 from a time series of phase differences $\Delta\Phi(t_k)$, $k = 1, \dots, N$
310 in the following way:

$$311 \text{PLI} = |\langle \text{sign}[\Delta\phi(t_k)] \rangle|$$

314 See Stam et al. (2007) for a complete description of PLI
315 calculation.

Data processing

EEG data were analysed in five frequency bands: 4–8 Hz, 8–10 Hz, 10–13 Hz, 13–20 Hz, and 20–30 Hz, in the third stage of the two maintenance conditions (i.e., retention stage: 14–19 s), and in the control condition. Data processing consisted of five steps. First, in the case of channels from which the data were evaluated as unexpectedly corrupted by noise, those channels were reconstructed as a linear combination of their nearest neighbours (Scan 4.4 software, Revision E, 2007). Second, EEG data were reformatted in a common average montage. Stam and de Bruin (2004) have shown that montages using mastoids as a reference accentuated long-distance coupling at the cost of small-scale detail, whereas source montages displayed the reverse. Common average montages had intermediate properties (Nunez et al., 1992) and such a montage was used in the present study. Third, ocular (blink) artefacts were reduced via spatial filtering (Scan 4.4 software, Revision E, 2007). Fourth, the EEG trials were segmented. For the two maintenance conditions, only the third stage (14–19 s) was considered for the EEG analysis. This stage was reduced to 4 s in length and the first second was discarded from further analysis to allow the subject to get accustomed to the change of the colour screen. For the control condition, lasting 60 s, the 15 first seconds were discarded and the following four seconds were selected for analysis (15–19 s). These time points were selected to coincide with the time window of the retention stage under the video and point-light maintenance conditions used for analysis. Finally, PLI was computed for all the electrode pairs, for the last four seconds of the third stage of each of the trials in the two maintenance conditions, for each subject, and frequency band. The PLI values were then averaged across trials for each subject, maintenance condition, electrode, and frequency band. For the 4 s-period of the control condition, the same procedure was adopted. To control for variability in PLI values due to individual differences such as scalp thickness, electrode placement, and impedance, functional connectivity was computed as the ratio of the PLI value during the two maintenance conditions relative to the PLI value during the control condition (i.e., $\text{PLI}_{\text{finalPL}} = \text{PLI}_{\text{point-light condition}} / \text{PLI}_{\text{control condition}}$ and $\text{PLI}_{\text{finalVideo}} = \text{PLI}_{\text{video condition}} / \text{PLI}_{\text{control condition}}$) (Ulloa and Pineda, 2007; Pineda and Hecht, 2009). A ratio of more than 1 indicates that the PLI value under the experimental condition is greater than the value under the control condition or vice versa. Conversely, a ratio equals to 1 means that the PLI value under the experimental condition is the same as the value obtained under the control condition. This ratio procedure was also undertaken to remove connectivity occurring during the experimental conditions and which was not related to the task to be performed.

Statistical analysis

To reduce the degrees of freedom in the statistical analyses, PLI from neighbouring electrode sites were averaged together to obtain one overall PLI value for each of the six following areas: frontal area (F7–F5–F3–F1–FZ–F2–F4–F6–F8), left temporal area (FT7–T7–C5–TP7–P7), central area (FC5–FC3–FC1–FCZ–FC2–FC4–FC6–C3–C1–CZ–C2–C4), right temporal area (FT8–T8–C6–TP8–P8), parietal area (CP5–CP3–CP1–CPZ–CP2–CP4–CP6–P5–P3–P1–PZ–P2–P4–P6), and occipital area (PO7–PO5–PO3–POZ–PO4–PO6–PO8–O1–OZ–O2) (see Fig. 2).

All statistical analyses were performed using Statistica 7.1. First, for each of the six frequency bands, 2 (conditions) \times 6 (areas) repeated-measures ANOVAs were performed. There were two within-subject factors; Condition (two levels: point-light motion maintenance and video motion maintenance) and Area (six levels: frontal, left temporal, central, right temporal, parietal, and occipital). Post hoc comparisons were calculated using Dun-

can tests where ANOVA results were significant and effect sizes (ES) for repeated measures (Long and Van Stavel, 1995) were reported.

When the interaction conditions by areas was significant, post hoc Duncan tests' comparisons were performed between $PLI_{finalPL}$ and $PLI_{finalVideo}$ values for each area to determine whether PLI_{final} values under the point-light condition were different from those obtained under the video condition. Duncan tests' comparisons were also calculated between the PLI_{final} values of each area (e.g., frontal area PLI_{final} value vs left temporal area PLI_{final} value, frontal area PLI_{final} value vs central area PLI_{final} value, frontal area PLI_{final} value vs right temporal PLI_{final} value, frontal area PLI_{final} value vs parietal area PLI_{final} value, frontal area PLI_{final} value vs occipital area PLI_{final} value, left temporal area PLI_{final} value vs central area PLI_{final} value, etc.). These comparisons allowed analysis of the functional connectivity between areas. Areas were thus grouped according to the value of their PLI_{final} and to statistically significant results. This procedure, previously employed by Cochin et al. (1998) and Calmels et al. (2006), allows the classification of areas into groups for each considered condition. Further details are provided in the Results section.

Before the ANOVA computation, the normality of the data was checked with the Kolmogorov Smirnov test. To verify the sphericity assumption in repeated measures designs, Mauchley's sphericity test was used.

Second, Wald–Wolfowitz runs tests were conducted. This analysis was performed when the interaction conditions by areas was significant. It verified whether the ratios under each maintenance condition (i.e., $PLI_{finalPL} = PLI_{point-light\ condition} / PLI_{control\ condition}$ and $PLI_{finalVideo} = PLI_{video\ condition} / PLI_{control\ condition}$) and within each of the six areas of interest were statistically different from a theoretical ratio of 1. If this was the case, it meant that PLI values under the maintenance conditions were significantly different to the PLI value under the control condition. As recommended by Siegel (1956), an adjusted- P value was adopted because of the small sample size. To address the problem of multiple comparisons, significant levels for the Wald–Wolfowitz runs tests were adjusted providing an alpha level of $P < .00417$ since 12 comparisons were examined within each of the six areas and for the two maintenance conditions.

RESULTS

Qualitative results

Regardless of condition, three (memory) strategies were identified during the interviews as being used by the subjects during the retention stage. The first was subvocal rehearsal and was employed by seven and six subjects

respectively under the point-light and video motion maintenance conditions. The second was an association of subvocal rehearsal and mental imagery. This association was used by four subjects under the point-light motion maintenance condition whereas five subjects used it under the video motion maintenance condition. Finally, two subjects used no strategies (i.e., one subject under the point-light motion maintenance condition and the second subject under the video motion maintenance condition) (see Table 1). The subjects also perceived the point-light motion maintenance condition to be more difficult and felt it required more concentration than the video motion maintenance condition.

Behavioural results

During the point-light motion and video motion maintenance conditions, the percentages of correct answers performed by the subjects were, respectively, 92.50% (SD = 6.98) and 98.06% (SD = 3.00). This difference was statistically significant (Wilcoxon, $T = 5.50$, $P = .04$). The subjects also reported that the maintenance of movement information from a video display was easier compared to that of the same movements from a point-light display (8.36 vs 6.36, Wilcoxon, $T = 0.00$, $P = .003346$).

EEG/PLI results

2 (Conditions) \times 6 (areas) repeated-measures ANOVAs were computed. The EEG data were normally distributed and no sphericity violations were observed. Only results for conditions by areas were reported in detail since they were directly linked to the goal of the present study. A significant conditions \times areas interaction was only revealed in the retention stage for the 13–20Hz frequency band, $F(5, 55) = 2.624$, $P < .035$ (see Table 2).

Wald–Wolfowitz runs tests with Bonferroni correction revealed significant differences between the ratios for the two maintenance conditions and a theoretical ratio of 1 within each of the six areas and ($Z_{adj} = 3.9655$, $P_{adj} = .000073$, 3 runs). PLI values under the maintenance conditions were significantly different to PLI values under the control condition. More specifically, PLI values under the point-light motion maintenance condition were higher than PLI values under the control condition within all areas except within the left temporal area. PLI values under the video motion maintenance condition were weaker compared to PLI values under the control condition within the frontal, right temporal, and occipital areas.

Duncan post hoc tests were computed and two results obtained. First, significant PLI differences were detected between the two maintenance conditions for the frontal and right temporal areas in the 13–20Hz frequency band. PLI_{final} values under the point-light motion maintenance condition were larger than PLI_{final} values under the video motion maintenance condition within the frontal and right temporal areas (1.01072 vs 0.98178, $P < .05$, ES = .23, frontal area; 1.02180 vs 0.99221, $P < .05$, ES = .16, right temporal area) (see Fig. 3).

Second, in the 13–20Hz frequency band, Duncan post hoc tests performed on the conditions by areas inter-

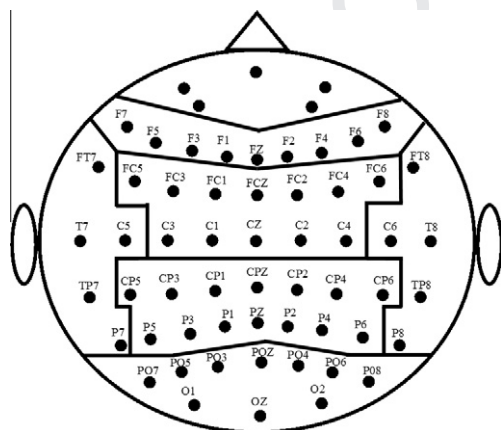


Fig. 2. The areas of interest.

Table 1. Strategies used by the subjects during the retention stage under the point-light and video maintenance conditions

	Point-light maintenance condition	Video maintenance condition
Subvocal rehearsal	7	6
Mental imagery + subvocal rehearsal	4	5
No strategies	1	1

Table 2. Summary of the 2 (conditions) × 6 (areas) repeated-measures ANOVAs for each frequency band

	4–8Hz		8–10Hz		10–13Hz		13–20Hz		20–30Hz	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
Condition	1.169	.30	35.278	*	2.411	.15	0.478	.50	2.030	.18
Area	0.335	.89	0.974	.44	0.825	.54	0.707	.62	1.028	.41
Condition × area	0.246	.94	0.683	.64	1.234	.31	2.624	*	1.892	.11

* Indicates statistically significant difference (* $P < .05$).

486 action allowed the classification of areas into groups for
 487 each maintenance condition. Areas were grouped by similar
 488 PLI_{final} (see Fig. 4). This way of proceeding allows a
 489 quick and clear view of significant differences between
 490 areas. For example, in the 13–20 Hz frequency band under
 491 the point-light motion maintenance condition, PLI_{final}
 492 for the frontal area, the left temporal area, the central
 493 area, the right temporal area, the parietal area, and the
 494 occipital area were 1.01072, 0.99565, 1.06177, 1.02180,
 495 1.06552, 1.01129 respectively. These areas can be
 496 ranked in the following decreasing order: parietal area,
 497 central area, right temporal area, occipital area, frontal
 498 area, and left temporal area. Duncan post hoc test re-
 499 vealed that the parietal area was not statistically different
 500 to the central area whereas the central area was statisti-
 501 cally different to the right temporal, occipital, frontal and
 502 left temporal areas. The right temporal area was not statisti-
 503 cally different to the occipital, frontal, and left temporal
 504 areas. Two groupings were thus made according to the
 505 PLI_{final} values' statistical equality under the point-light mo-
 506 tion maintenance condition (see Fig. 4). Using the same
 507 approach, under the video motion maintenance, three
 508 groups of areas were identified (see Fig. 4).

DISCUSSION

509
 510 The aim of this study was to investigate the mechanisms
 511 to maintain in memory, for short periods of time, familiar
 512 movement information stemming on one hand from an
 513 unfamiliar display and on the other hand from a realistic,
 514 familiar display. As expected, results showed that these
 515 mechanisms were different in the beta frequency band.
 516 First, functional connectivity, assessed by PLI , differed
 517 within the frontal and right temporal areas under the two
 518 maintenance conditions (i.e., point-light and video main-
 519 tenance conditions). Second, functional connectivity be-
 520 tween areas displayed different patterns under the
 521 maintenance conditions. To explain these findings, the
 522 discussion has been organized into four sections. The
 523 first section discusses qualitative data while the second

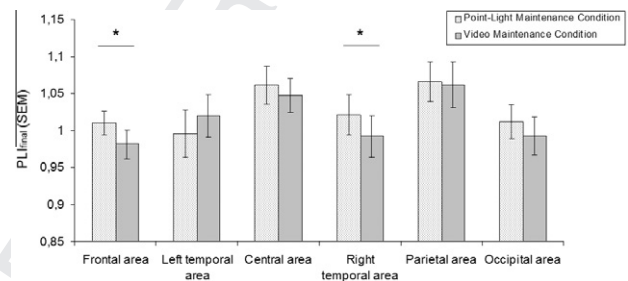


Fig. 3. PLI_{final} values in the 13–20Hz frequency band under the point-light and video motion maintenance conditions within the frontal, temporal, central, parietal, and occipital areas. Asterisk (*) indicates statistically significant difference (* $P < .05$).

524 considers EEG activity data. The third focuses on func-
 525 tional connectivity within the frontal and right temporal
 526 areas and the last reviews functional connectivity be-
 527 tween areas.

528 The reader should bear in mind that caution must be
 529 exerted when interpreting the results of this study. Stimuli
 530 presented to the subjects (i.e., biological movements)
 531 were different to those reported in conventional working
 532 memory studies (i.e., letters, digits, words, smooth
 533 shapes, matrixes containing coloured targets, and spatial
 534 locations). Consequently, the durations of the cue stimu-
 535 lus and retention stages are much longer than those em-
 536 ployed in traditional studies of working memory. In
 537 traditional studies, durations are about a subsecond for
 538 the presentation of the cue stimulus and a few seconds
 539 for the retention stage. This disparity does not allow for
 540 absolute comparisons since different mechanisms may
 541 underlie the working memory maintenance process in
 542 these two cases.

Qualitative data

543
 544 Qualitative data stemming from the interviews fit the the-
 545 oretical model of working memory devised by Baddeley
 546 and Hitch (1974), Baddeley (1986, 2000, 2010) and Re-

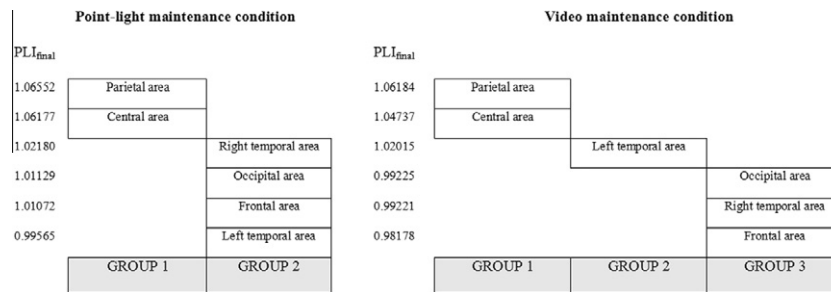


Fig. 4. Area classification in groups in the 13–20Hz frequency band for each maintenance condition. This classification allows a quick and clear view of significant differences between areas.

547 **povs and Baddeley (2006).** During the retention stage, the
 548 subjects reported using either subvocal rehearsal or a
 549 combination of subvocal rehearsal and imagery to help
 550 them retain movement information in order to be able to
 551 recognize them at a later stage. These strategies are
 552 rehearsal strategies which prevent the information from
 553 decaying. This can correspond to the process of active
 554 rehearsal described by **Baddeley (1986, 2000, 2010).**
 555 Two subjects also declared using no strategies. This
 556 can reflect passive storage of information which is one
 557 component of the maintenance mechanism in **Baddeley's**
 558 working memory model. This can also mean that these
 559 two subjects were not aware of the strategies they em-
 560 ployed. Implicit strategies have been used. Finally, most
 561 of the subjects declared using subvocal rehearsal alone
 562 or in combination with mental imagery. This point reveals
 563 that the subjects transformed the visually-presented
 564 movements into subvocal representations and repeated
 565 them during the retention stage. They recoded visual
 566 items into phonological forms. This strategy can be linked
 567 to the phonological loop model (**Baddeley, 1986; Burgess**
 568 **and Hitch, 1999**). The phonological loop can deal with
 569 information that is presented visually. This visual infor-
 570 mation is transformed into a phonological code by subvocal-
 571 ization (**Wilson and Emmorey, 1997**) and is thus able to
 572 enter the phonological store. This process can be desig-
 573 nated as a manipulation process which has been charac-
 574 terized by **Henson (2001, p. 151)** as involving more than a
 575 simple maintenance, i.e. it requires a transformation or
 576 "re-representation." For example, reordering the words
 577 of a presented list in alphabetic order could be defined
 578 as a manipulation.

579 EEG activity data

580 The presence of functional connectivity differences in the
 581 beta frequency band (i.e., 13–20Hz) was expected and is
 582 in accordance with the results of earlier studies (**Tallon-**
 583 **Baudry et al., 1998, 1999, 2001; Hwang et al., 2005; Leib-**
 584 **berg et al., 2006; Pesonen et al., 2007; Altamura et al.,**
 585 **2010; Calmels et al., 2011**). These studies have shown
 586 that beta oscillations were related to the rehearsing pro-
 587 cess of the sensory trace in memory. This point is in
 588 accordance with the present subjects' reports. The major-
 589 ity of them declared using subvocal rehearsal and (men-
 590 tal) imagery to help them maintain in memory
 591 movement information. This difference in beta frequency

592 band is also in agreement with previous data which have
 593 reported particular activity in beta frequency band when
 594 nonhuman primates and humans anticipated the presen-
 595 tation of visual stimuli (**Gross et al., 2004, 2006; Zhang**
 596 **et al., 2008; Altamura et al., 2010**): a synchronization
 597 activity in the beta frequency band was observed. For in-
 598 stance, **Altamura et al. (2010)**, using MEG, investigated
 599 MEG signal modulations when subjects performed a mod-
 600 ified version of a letter Sternberg memory task. During the
 601 preparatory stage, increases in beta power (i.e., synchro-
 602 nization) within the dorsolateral prefrontal cortex, the left
 603 inferior prefrontal gyrus, and the left parietal and temporal
 604 areas were revealed. During the retention stage, a de-
 605 crease in beta power (i.e., desynchronization) within the
 606 prefrontal areas and an increase in beta power within
 607 the visual areas were also detected. In the present study,
 608 the subjects knew in advance which kind of display would
 609 be presented in the recognition task. Indeed, the display
 610 configuration in the observed stage (i.e., stage 2) was
 611 similar to the one shown during the recognition task stage
 612 (i.e., stage 4). For example, if in stage 2, a video display
 613 was exhibited, a video display would have been pre-
 614 sented in stage 4. The same principle has been applied
 615 for a point-light display. It is therefore likely that the sub-
 616 jects anticipated the forthcoming task and that the beta
 617 rhythm responses were associated to the anticipatory
 618 processing.

619 Functional connectivity PLI differences were detected
 620 within the frontal and (right) temporal areas. Interestingly,
 621 these two areas are recognized as playing a role during
 622 the delay period of a working memory task (i.e., retention
 623 period) (**Smith et al., 1995; Barch et al., 1997; Courtney**
 624 **et al., 1997; Druzgal and d'Esposito, 2003; Ranganath**
 625 **et al., 2004; Sakai and Passingham, 2006; Altamura**
 626 **et al., 2010**). For example, during the working memory de-
 627 lay period, **Ranganath et al. (2004)** with fMRI have shown
 628 the involvement of the prefrontal and inferior temporal
 629 cortices which have complementary roles. The temporal
 630 cortex was more sensitive to the type of information that
 631 had to be retained in memory whereas the prefrontal cor-
 632 tex was affected by memory load.

633 Computation of PLI may be slightly affected by the sig-
 634 nal-to-noise ratio. There may be a possible effect of differ-
 635 ence in amplitude on signal-to-noise ratio which can
 636 impinge upon phase measurement and indirectly upon
 637 PLI. However, in the present study, a lot of noise (e.g.,
 638 amplifier, electrode noise, muscle activity) was outside

639 the pass band of the data. Besides, ocular artefacts were
640 corrected and a ratio procedure was employed. PLI val-
641 ues were also averaged across trials for each subject per-
642 mitting improved signal-to-noise ratio. These points lead
643 to the conclusion that signal-to-noise ratio is not a typical
644 problem of PLI and does not likely play a very large role in
645 this study.

646 Finally, maintaining motion information presented via
647 video displays resulted in less functional connectivity than
648 passively staring at an amber screen within the frontal,
649 right temporal, and occipital areas. This finding suggests
650 that functional connectivity is more extensive during a
651 resting state than during an active state. This point is sup-
652 ported by Shulman et al. (1997), Mazoyer et al. (2001),
653 and Wicker et al. (2003). In their meta-analysis, these
654 authors have shown that groups of brain areas were ac-
655 tive at rest (i.e., in a state where the eyes are closed, during
656 visual fixation, during passive observation of a visual stim-
657 ulti, or in situations in which relaxing and thinking of noth-
658 ing was proposed) and that this activity decreased during
659 the completion of diversified goal-directed actions. In the
660 literature, this process refers to the concept of 'default
661 mode.' It has been revealed mainly via fMRI or positron
662 emission tomography (PET) techniques and was com-
663 posed of a network including the medial temporal lobe,
664 the medial, lateral, and inferior parietal regions, the precu-
665 neus, and the medial prefrontal and post cingulate corti-
666 ces. A question that may arise is why the same
667 phenomenon was not observed under the maintenance
668 of motion information presented through point-light dis-
669 plays. It can be speculated that maintenance under that
670 condition was more demanding than maintenance under
671 the video condition. This suggestion corroborates the sub-
672 jects' report. Subjects perceived the maintenance and
673 recognition of movements from a point-light display as
674 more difficult than the maintenance and recognition from
675 a video display. This perception is in agreement with the
676 scores obtained by the subjects on the Likert scale and
677 the percentages of correct answers when performing
678 the Sternberg task under the two maintenance conditions.
679 The subjects also declared themselves to be more con-
680 centrated and focused on details during the retention per-
681 iod under the point-light motion condition. Perception of
682 difficulty under the point-light condition may have required
683 more energy compared to that needed under the video
684 and control conditions. This cost analysis implies that
685 maintaining motion information presented via point-light
686 displays may have resulted in more functional connectiv-
687 ity than passively observing a monochrome amber
688 screen.

689 **Functional connectivity within the frontal and right** 690 **temporal areas**

691 Functional connectivity within the frontal and right temporal
692 areas was greater under the point-light motion mainte-
693 nance condition compared to the video motion mainte-
694 nance condition. It can be suggested that cortical activity
695 during the retention stage is sensitive to the expected per-
696 ceptual difficulty of the upcoming task to perform (i.e., rec-
697 ognition task). In the present study, the subjects knew in
698 advance which kind of display would be presented in the

699 recognition task. It is therefore possible that the subjects
700 anticipated the forthcoming task. They had expectations
701 on the demands, on the perceptual difficulty of this task.
702 Under the point-light motion maintenance condition, the
703 higher values of functional connectivity within the frontal
704 and right temporal areas could be the result of a greater
705 cognitive demand, a greater attentional demand which
706 may have a cost and can recruit additional neuron popula-
707 tion. This explanation corroborates the subjects' report
708 (see above) and concurs with the findings of Offen et al.
709 (2009), Ress et al. (2000), and Lepsien et al. (2011). Ress
710 et al. (2000) reporting that preparatory cortical activity in-
711 creased as task difficulty increased. Along the same lines,
712 work by Offen et al. (2009) and Lepsien et al. (2011) has
713 shown that during working memory maintenance, activity
714 in the visual cortex intensified as a function of the expected
715 difficulty of an upcoming recognition task. Following this
716 line of reasoning, it can be suggested that the anticipation
717 explanation is to some degree related to the process of
718 attention. As reported by Reuter-Lorenz and Jonides
719 (2008), all working memory tasks entail attentional control
720 but the degree of this control is modulated by task de-
721 mands, individual differences, and/or ageing. In the pres-
722 ent case, task demands seem to be the cause of this
723 modulation. Expectation of the perceptual difficulty of the
724 upcoming task could have generated a greater attentional
725 demand which was expressed by a higher functional con-
726 nectivity under the point-light motion maintenance
727 condition.

728 A second explanation derived from the subjects' de-
729 tailed debriefs, can be proposed. This explanation is cen-
730 tred on the strategy of mental imagery. While admittedly
731 speculative because of the unequal distribution between
732 the reported strategies used by the subjects, the authors
733 made the decision to briefly evoke this explanation. While
734 it is potentially an interesting suggestion, additional inves-
735 tigation is required for its support. Here, subjects stated
736 that mental imagery used in the retention stage, after
737 the exposure of movements embedded in impoverished
738 and unfamiliar displays which are devoid of colour and
739 form information, took into account the colour, the shape,
740 the shading, and the contours of movements. This means
741 that subjects had to code the visual information presented
742 through Johansson's point light patterns into a mental rep-
743 resentation including structural and contextual information
744 such as colours, forms, and contours. This mental rear-
745 rangement or manipulation may entail additional re-
746 sources which could be expressed by a higher
747 functional connectivity within the frontal and right temporal
748 areas under the point-light motion maintenance condition
749 compared to the video motion maintenance condition.
750 This interpretation is in accordance with findings pre-
751 sented by Sauseng et al. (2005) who observed stronger
752 cortical coupling as subjects had to manipulate spatial
753 information and to maintain it in memory compared to
754 the situation in which they had only to keep this informa-
755 tion in memory before completing a recognition task.

756 **Functional connectivity between areas**

757 Under the point-light maintenance condition, functional
758 connectivity was greater within the parietal and central

759 areas compared to the four other areas. Under the video
760 maintenance condition, a different pattern was seen.
761 Functional connectivity of the left temporal area was
762 weaker compared to those of parietal and central areas
763 and stronger than those of occipital, right temporal and
764 frontal areas. It means that functional connectivity be-
765 tween areas changes according to the working memory
766 task performed and more specifically to the display in
767 which the movement to retain was presented. The left
768 temporal area seems to play a specific role. This result
769 is difficult to explain. What can be advanced is that activity
770 within the left temporal area may indirectly reflect the
771 activity of Wernicke's area, an area only present in the left
772 hemisphere and considered to be devoted to phonological
773 storage (Paulesu et al., 1993). It can thus be speculated
774 that under the video maintenance condition, the subjects
775 may have verbally coded and stored in Wernicke's area,
776 additionally to motion information, information related to
777 colour and form. This greater amount of colour and form
778 information might have required additional cortical re-
779 sources which could have been expressed by a higher
780 functional connectivity within the left temporal area com-
781 pared to that detected within the right temporal, occipital
782 and frontal areas under the video maintenance condition.
783 In contrast to the video display, the point-light display is a
784 minimalist display devoid of colour and form information.
785 The storage of information stemming from this kind of dis-
786 play thus required less resources, less cognitive demands
787 possibly leading to a lack of significant differences in func-
788 tional connectivity between the left temporal area and the
789 right temporal, occipital and frontal areas. This interpreta-
790 tion seems to be in line with the trend observed within the
791 left temporal area when PLI_{final} value under the point-light
792 maintenance condition was compared with that detected
793 in the video maintenance condition (0.99565 vs
794 1.02015, $P = .07$).

795 5. CONCLUSION

796 In conclusion, the study reveals that the mechanisms to
797 maintain temporarily in memory familiar movement infor-
798 mation stemming from an unfamiliar display are different
799 to those involved when (movement) information emanates
800 from a familiar display. Changes in functional connec-
801 tivity were mainly discussed in the light of the
802 process of anticipation. Subjects' perception of the ex-
803 pected difficulty of the upcoming recognition task has
804 been considered. However, further experiences are
805 needed to cast some light on working memory mainte-
806 nance process of biological movements.

807 *Acknowledgements—This study was supported by a grant from*
808 *the French Ministry of Health, Youth, and Sports. The funders*
809 *had no role in study design, data collection, analysis and interpre-*
810 *tation, decision to publish, or preparation of the manuscript.*

811 *The authors are grateful to the participants who took part in this*
812 *study and to Magaly and Mélyny Hars for the stimuli construction,*
813 *the video production, and the video footage editing.*
814 *Part of this paper was presented at the 18th Annual Meeting of*
815 *the Organization for Human Brain Mapping, Beijing, June 2012.*

REFERENCES

- Altamura M, Goldberg TE, Elvevag B, Holroyd T, Carver FW, Weinberger DR, Coppola R (2010) Prefrontal cortex modulation during anticipation of working memory demands as revealed by magnetoencephalography. *Int J Biomed Imaging* 2010. <http://dx.doi.org/10.1155/2010/840416>. 817
- Baddeley AD Working memory. Oxford: University Press; 1986. 818
- Baddeley AD (2000) The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends Cogn Sci* 4:417–423. 819
- Baddeley AD Working memory thought, and action. Oxford: University Press; 2010. 820
- Baddeley AD, Hitch G Working memory. In: Bower GH, editor. The psychology of learning and motivation: advances in research and theory. New York: Academic Press; 1974. p. 47–89. 821
- Barch DM, Braver TS, Nystrom LE, Forman SD, Noll DC, Cohen JD (1997) Dissociating working memory from task difficulty in human prefrontal cortex. *Neuropsychologia* 35:1373–1380. 822
- Burgess N, Hitch GJ (1999) Memory for serial order: a network model of the phonological loop and its timing. *Psychol Rev* 106:551–581. 823
- Calmels C, Foutren M, Stam CJ (2011) Influences of instructions and expertise on the mechanisms involved during a working memory task. *J Psychol* 25:105–115. 824
- Calmels C, Holmes P, Jarry G, Hars M, Lopez E, Paillard A, Stam C (2006) Variability of EEG synchronization prior to and during observation and execution of a sequential finger movement. *Hum Brain Mapp* 27:251–266. 825
- Cochin S, Barthelemy C, Lejeune B, Roux S, Martineau J (1998) Perception of motion and qEEG activity in human adults. *Electroenceph Clin Neurophysiol* 107:287–295. 826
- Courtney SM, Ungerleider LG, Keil K, Haxby JV (1997) Transient and sustained activity in a distributed neural system for human working memory. *J Psychol* 386:608–611. 827
- Douw L, van Dellen E, de Groot M, Heimans JJ, Klein M, Stam CJ, Reijneveld JC (2010) Epilepsy is related to theta band brain connectivity and network topology in brain tumor patients. *BMC Neurosci* 23:11–103. 828
- Druzgal TJ, d'Esposito M (2003) Dissecting contributions of prefrontal cortex and fusiform face area to face working memory. *J Cogn Neurosci* 15:771–784. 829
- Fiehler K, Burke M, Engel A, Bien S, Rosler F (2008) Kinesthetic working memory and action control within the dorsal stream. *Cereb Cortex* 18:243–253. 830
- Gross J, Schmitz F, Schnitzler I, Kessler K, Shapiro K, Hommel B, Schnitzler A (2004) Modulation of long-range neural synchrony reflects temporal limitations of visual attention in humans. *Proc Natl Acad Sci USA* 101:13050–13055. 831
- Gross J, Schmitz F, Schnitzler I, Kessler K, Shapiro K, Hommel B, Schnitzler A (2006) Anticipatory control of long-range phase synchronization. *Eur J Neurosci* 24:2057–2060. 832
- Hars M, Hars M, Stam C, Calmels C (2011) Effects of visual context upon functional connectivity during observation of biological motions. *PLoS ONE* 6(10):e25903. 833
- Henson RNA Neuronal working memory: applications of the working memory model to neuropsychology and neuroimaging. In: Andrade J, editor. Working memory: a work in progress. London: Routledge; 2001. p. 151–173. 834
- Hwang G, Jacobs J, Geller A, Danker J, Sekuler R, Kahana MJ (2005) EEG correlates of verbal and nonverbal working memory. *Behav Brain Funct* 1:20. 835
- Johannson G (1973) Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Percept Psychophys* 14:201–211. 836
- Lepsien J, Thornton I, Nobre A (2011) Modulation of working-memory maintenance by directed attention. *Neuropsychologia* 49:1569–1577. 837
- Leiberg S, Lutzenberger W, Kaiser J (2006) Effects of memory on cortical oscillatory activity during auditory pattern working memory. *Brain Res* 1120:131–140. 838
- Long BC, van Stavel R (1995) Effects of exercise training on anxiety: a meta-analysis. *J Appl Sport Psychol* 7:167–189. 839

- 885 Mazoyer B, Zago L, Mellet E, Bricogne S, Etard O, Houdé O, Crivello
886 F, Joliot M, Petit L, Tzourio-Mazoyer N (2001) Cortical networks
887 for working memory and executive functions sustain the
888 conscious resting state in man. *Brain Res Bull* 54:287–298.
- 889 McFarland DJ, Miner LA, Vaughan TM, Wolpaw JR (2000) Mu and
890 beta rhythm topographies during motor imagery and actual
891 movements. *Brain Topogr* 12:177–186.
- 892 Neuper C, Pfurtscheller G Motor imagery and ERD. In: Pfurtscheller
893 G, Lopes da Silva FH, editors. *Event-related desynchronization.*
894 *Handbook of electroencephalography and clinical*
895 *neurophysiology.* Amsterdam: Elsevier; 1999. p. 303–325.
- 896 Nunez A, Amzica F, Steriade M (1992) Intrinsic and synaptically
897 generated delta (1–4 Hz) rhythms in dorsal lateral geniculate
898 neurons and their modulation by light-induced fast (30–70 Hz)
899 events. *Neuroscience* 51:269–284.
- 900 Nuwer MR, Lehmann FL, da Silva D, Matsuoka S, Sutherling W,
901 Vibert JF (1999) IFCN guidelines for topographic and frequency
902 analysis of EEGs and EPs. *The International Federation of*
903 *Clinical Neurophysiology. Electroencephalog Clin Neurophysiol*
904 *Suppl* 52:15–20.
- 905 Offen S, Schluppeck D, Heeger DJ (2009) The role of early visual
906 cortex in visual short-term memory and visual attention. *Vision*
907 *Res* 49:1352–1362.
- 908 Oldfield RC (1971) The assessment and analysis of handedness: the
909 Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 9:97–113.
- 910 Paulesu E, Frith CD, Frackowiak RS (1993) The neural correlates of
911 the verbal component of working memory. *Nature* 362:342–345.
- 912 Pesonen M, Hamalainen H, Krause CM (2007) Brain oscillatory 4–
913 30 Hz responses during a visual n-back memory task with varying
914 memory load. *Brain Res* 1138:171–177.
- 915 Pfurtscheller G, Neuper C (1997) Motor activity activates primary
916 sensorimotor area in humans. *Neurosci Lett* 239:65–68.
- 917 Pfurtscheller G, Neuper C, Flotzinger D, Pregenzer M (1997) EEG-
918 based discrimination between imagination of right and left hand
919 movement. *Electroen Clin Neuro* 103:1–10.
- 920 Pineda JA, Hecht E (2009) Mirroring and mu rhythm involvement in
921 social cognition: are there dissociable subcomponents of theory of
922 mind? *Biol Psychol* 80:306–314.
- 923 Pochon JB, Levy R, Poline JB, Crozier S, Lhéricy S, Pillon B,
924 Deweer B, Le Bihan D, Dubois B (2001) The role of dorsolateral
925 prefrontal cortex in the preparation of forthcoming actions: an
926 fMRI study. *Cereb Cortex* 11:260–266.
- 927 Postle BR, Berger JS, Taich AM, d'Esposito M (2000) Activity in
928 human frontal cortex associated with spatial working memory and
929 saccadic behavior. *J Cogn Neurosci* 12:2–14.
- 930 Ress D, Backus BT, Heeger DJ (2000) Activity in primary visual
931 cortex predicts performance in a visual detection task. *Nat*
932 *Neurosci* 3:940–945.
- 933 Ranganath C, DeGustis J, d'Esposito M (2004) Category-specific
934 modulation of inferior temporal activity during working memory
935 encoding and maintenance. *Cogn Brain Res* 20:37–45.
- 936 Repovs G, Baddeley A (2006) The multi-component model of working
937 memory: explorations in experimental cognitive psychology.
938 *Neuroscience* 139:5–21.
- 939 Reuter-Lorenz PA, Jonides J The executive is central to working
940 memory. In: Conway ARA, Jarrold C, Kane MJ, Miyake A, Towse
941 JN, editors. *Insights from age performance and task variations.*
942 Variation in working memory. New York: Oxford University Press;
943 2008. p. 250–271.
- 944 Sakai K, Rowe JB, Passingham RE (2002) Active maintenance in
945 prefrontal area 46 creates distractor-resistant memory. *Nat*
946 *Neurosci* 5:479–484.
- 947 Sakai K, Passingham RE (2006) Prefrontal set activity predicts rule-
948 specific neural activity during subsequent cognitive performance.
949 *J Neurosci* 26:1211–1218.
- 950 Sarthein J, Petsche H, Rappelsberger P, Shaw GL, Von Stein A
951 (1998) Synchronization between prefrontal and posterior
952 association cortex during human working memory. *Proc Natl*
953 *Acad Sci USA* 95:7092–7096.
- 954 Sauseng P, Klimesch W, Doppelmayr M, Pecherstorfer T,
955 Freunberger R, Hanslmayr S (2005) EEG alpha synchronization
956 and functional coupling during top-down processing in a working
957 memory task. *Hum Brain Mapp* 26:148–157.
- 958 Shulman GL, Fiez JA, Corbetta M, Buckner RL, Miezen F, Raichle
959 ME, Petersen SE (1997) Common blood changes across visual
960 tasks. II: Decreases in cerebral cortex. *J Cogn Neurosci*
961 9:648–663.
- 962 Siegel S Non parametric statistics for the behavioural sciences. New
963 York: McGraw-Hill, Inc.; 1956.
- 964 Smith EJ, Balogh A, Burton ME, Erdos G, Forsyth RJ (1995) Results
965 of the Ulysses fast latitude scan: magnetic field observations.
966 *Geophys Res Lett* 22:3325.
- 967 Stam CJ, de Bruin EA (2004) Scale-free dynamics of global functional
968 connectivity in the human brain. *Hum Brain Mapp* 22:97–109.
- 969 Stam CJ, Van Cappellen van Walsum AM, Micheloyannis S (2002)
970 Variability of EEG synchronization during a working memory task
971 in healthy subjects. *Int J Psychophysiol* 46:53–66.
- 972 Stam CJ, Nolte G, Daffertshofer A (2007) Phase lag index:
973 assessment of functional connectivity from multi channel EEG
974 and MEG with diminished bias from common sources. *Hum Brain*
975 *Mapp* 28:1178–1193.
- 976 Tallon-Baudry C, Bertrand O, Peronnet F, Pernier J (1998) Induced γ -
977 band activity during the delay of a visual short-term memory task
978 in humans. *J Neurosci* 18:4244–4254.
- 979 Tallon-Baudry C, Kreiter A, Bertrand O (1999) Sustained and
980 transient oscillatory responses in the gamma and beta bands in
981 a visual short-term memory task in humans. *Vis Neurosci*
982 16:449–459.
- 983 Tallon-Baudry C, Bertrand O, Fischer C (2001) Oscillatory synchrony
984 between human extrastriate areas during visual short-term
985 memory maintenance. *J Neurosci* 21:1–5.
- 986 Ulloa ER, Pineda JA (2007) Recognition of point-light biological
987 motion: mu rhythms and mirror neuron activity. *Behav Brain Res*
988 183:188–194.
- 989 Vermersch P L'entretien d'explicitation. Paris: Edition ESF; 2003.
- 990 Wicker B, Ruby P, Royet JP, Fonlupt P (2003) A relation between rest
991 and the self in the brain? *Brain Res Rev* 43:224–230.
- 992 Wilson M, Emmorey M (1997) A visuospatial «phonological loop» in
993 working memory: evidence from American sign language. *Mem*
994 *Cognit* 25:313–320.
- 995 Zhang Y, Wang X, Bressler SL, Chen Y, Ding M (2008) Prestimulus
996 cortical activity is correlated with speed of visuomotor processing.
997 *J Cogn Neurosci* 20:1915–1925.

(Accepted 23 March 2012)
(Available online xxxx)