Fatigue, surentraînement, récupération

Claire Calmels, Swann Pichon, Julie Grèzes, Carpentier Caroline

▶ **To cite this version:**

Claire Calmels, Swann Pichon, Julie Grèzes, Carpentier Caroline. Fatigue, surentraînement, récupération : L'observation : une solution au surentraînement et à la récupération ? Etude des bases neurales impliquées lors de l'observation d'actions chez des sportifs sains et blessés.. [Rapport de recherche] 07-012, Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance (INSEP). 2011. hal-01949728

HAL Id: hal-01949728
https://insep.hal.science//hal-01949728

Submitted on 10 Dec 2018

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

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

SERVICE RECHERCHE
MISSION DU SPORT DE HAUT NIVEAU

INSEP

RAPPORT DE RECHERCHE
N° 07-012 *JUIN 2011*

FATIGUE, SURENTRAÎNEMENT, RÉCUPÉRATION

L'OBSERVATION : UNE SOLUTION AU SURENTRAÎNEMENT ET À LA RÉCUPÉRATION ?

ÉTUDE DES BASES NEURALES IMPLIQUÉES LORS DE L'OBSERVATION D'ACTIONS CHEZ DES SPORTIFS SAINS ET BLESSÉS

Claire CALMELS [1]

COLLABORATEURS SCIENTIFIQUES

Swann PICHON [2]

Julie GRÈZES [3,4],

COLLABORATEUR SPORTIF

Caroline CARPENTIER

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

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

2. Laboratory for Behavioral Neurology and Imaging of Cognition, Departement of Neuroscience, Medical School of Geneva, Switzerland

3. LNC - INSERM U960 - DEC Ecole Normale Supérieure, Paris, France

4. Centre de NeuroImagerie de Recherche (CENIR), Paris, France

FINANCEMENT

Ministère de la Santé et des Sports, Secrétariat d'État aux Sports

couvertureBAT.indd 3 07/06/11 11:38

SOMMAIRE

Remerciements …… 1

INTRODUCTION GENERALE …… 2

ETAT DE L'ART ……... 5

METHODOLOGIE ……. 8

Sujets …….. 8
Stimuli …… 9
Procédure Expérimentale ……... 11
Etude Pilote …….. 11
Examen par IRM …….. 12
Acquisition des Données IRMf ……..... 13
Prétraitement des Données IRMf ……... 14
Analyses Statistiques des Données IRMf …….. 14

RESULTATS……... 16

Résultats Comportementaux …….. 16
Résultats IRMf ……... 17

DISCUSSION ……. 21

Aire Somatosensorielle, Gyrus Postcentral BA2 ……... 22
AMS et Cortex Moteur Cingulaire…….. 24
STS et Gyrus Fusiforme …… 25

CONCLUSION ……... 27

REFERENCES …… 29

ANNEXE 1 …… 34
ANNEXE 2 …… 36
ANNEXE 3 (Communication Congrès International HBM, Canada)……. 38

Remerciements

Le projet intitulé «L'Observation : une Solution au Surentraînement et à la Récupération ? Etude des Bases Neurales Impliquées lors de l'Observation d'Actions chez des Sportifs Sains et Blessés» a été soutenu financièrement par le Ministère de la Santé et des Sports, Secrétariat d'Etat aux Sports.

Les auteurs de ce rapport remercient sincèrement les gymnastes pour leur participation volontaire et active à ce projet et leurs entraîneurs.

Plus particulièrement, Merci à :

Jessy Adapen, Marion Beneteau, Charlotte Bultez, Roxane Castanheira, Mélanie Daule, Estelle Dray, Myriam El Kouklo, Magaly Hars, Hélène Hennequin, Charlotte Hubert, Lauryne Foye, Alix Gabry, Marie Gourtay, Elodie Jean Alphonse, Kelly Joyce, Elia Lefevre, Lucie Lepaon, Marine Lerouge, Léa Leslukawski, Rebecca Meyrueis, Laura Monteiro, Gwendoline Papegaye, Magaux Peignel, Cécile Pocholle, Alice Prevost, Nathalie Renouard, Céline Sismeiro, Cynthia Stevens, Emilie Thoulé, Lydie Tiago, Luxisle Siewe Tola.

Un grand merci également à l'Equipe du CENIR sans qui ce projet n'aurait pu aboutir….

INTRODUCTION GENERALE

Le but de ce projet était d'améliorer la compréhension des processus mobilisés lors de l'observation d'actions motrices chez l'être humain. Ces processus incomberaient à l'activation d'un système de neurones présentant des propriétés particulières et dénommés «système des neurones miroirs.» Ce système suggère que la perception d'une action stimule dans le cerveau de l'observateur une représentation analogue à celle qu'il aurait élaborée s'il avait réalisé lui-même cette action (Grèzes et al., 2003).

On peut aisément comprendre l'intérêt majeur de cette suggestion et des conséquences pratiques susceptibles d'en découler. Si les représentations motrices sont similaires lors de l'observation d'une action et lors de l'exécution de cette même action, alors la pratique physique ne serait peut-être plus la seule modalité à prendre en considération lors de l'apprentissage moteur que ce soit dans les phases initiales ou finales de cet apprentissage. Par exemple, dans le domaine de l'entraînement sportif, la mise en place de sessions d'observation, au cours desquelles l'athlète visionnerait des séquences motrices spécifiques, pourrait permettre une diminution des charges d'entraînement, si importante en sport de haut niveau et prévenir ainsi l'apparition d'un syndrome de surentraînement. Cet état de surentraînement est bien souvent la conséquence de saisons sportives trop longues, de compétitions trop nombreuses, de charges d'entraînement excessives, de répétitions d'exercices trop importantes et peu variées, et d'un temps de récupération insuffisant. De même, l'instauration de sessions d'observation chez des athlètes blessés, victimes de lésions musculaires et/ou tendineuses, s'avèrerait bénéfique dans le sens où elle pourrait améliorer leur

récupération. Lors de la reprise sportive, on pourrait assister à des progrès plus rapides chez ces sportifs grâce à d'éventuelles restructurations cérébrales. Ces restructurations seraient générées suite à l'exposition répétée d'exécutions correctes d'habiletés motrices diverses et variées via l'utilisation de la vidéo.

L'efficacité de ces applications pratiques reste, à l'heure actuelle, à être démontrée. La connaissance précise et approfondie des propriétés du système des neurones miroirs nous semble être un pré-requis indispensable à cette démarche. Malheureusement, les propriétés de ce système ne sont pas, actuellement, entièrement connues.

C'est pourquoi ce projet s'est attaché à étudier les mécanismes de l'observation chez des sportifs blessés étant dans l'incapacité temporaire de réaliser des gestes sportifs auparavant maîtrisés. Plusieurs questions ont été posées. Le système des neurones miroirs s'active-t-il chez ces sportifs? Si tel est le cas, la mise en jeu de ce système est-elle similaire chez des sportifs blessés et chez des sportifs sains? Les réponses à ces questions ont permis une meilleure connaissance des mécanismes d'observation dans le cas particulier où des individus étaient privés momentanément d'informations kinesthésiques et proprioceptives. Nous espérons, également, que ces résultats susciteront un questionnement des acteurs du milieu sportif qui leur permettra d'optimiser leur pratique quotidienne afin d'atteindre une performance optimale.

Enfin, ce projet s'est inscrit dans un programme financé par le Ministère de la Santé et des Sports, Secrétariat d'Etat aux Sports. Il s'est basé sur une collaboration

entre (i) le Laboratoire Mouvement Action et Performance du Service Recherche de l'INSEP, (ii) le Laboratoire de Neurosciences Cognitives (INSERM U960) de l'Ecole Nationale Supérieure de Paris, (iii) le Département de Neuroscience de l'Ecole Médicale de Genève, et (iv) le Centre de Neuroimagerie (CENIR) de Paris. Ce projet a également reçu l'avis favorable du Comité de Protection des Personnes (CPP) de l'Ile de France VI et l'accord de la Direction Générale de la Santé (DGS 2006-0065) pour sa réalisation.

Les résultats de ce rapport ont donné lieu à deux communications. La première a été présentée dans le cadre des entretiens de l'INSEP «Prévention-Gestion de la Blessure chez le(la) Sportif(ve) de Haut Niveau» (14-15 juin 2011, Paris, France). La seconde a été réalisée lors du 17ème Congrès International de «Human Brain Mapping» (26-30 juin 2011, Quebec City, Canada). Un article scientifique a également été soumis dans la revue internationale indexée «European Journal of Neuroscience» (IF = 3.418).

ETAT DE L'ART

L'observation des actions d'autrui implique chez l'être humain la mise en jeu d'un réseau neuronal connu sous le nom de système des neurones miroirs (SNM). Ce système solliciterait les représentations des commandes motrices nécessaires à l'exécution de l'action observée (e.g., Rizzolatti et al., 2001; Calvo-Merino et al., 2005, 2006). Ce point de vue est en accord avec la théorie de la simulation (Gallese & Goldman, 1998) qui postule que «se mettre à la place des autres» permettrait de comprendre et de prédire leurs actions, leurs comportements. En d'autres termes, la perception d'une action entraînerait, génèrerait une activité motrice non directement visible (Jeannerod, 1994, 2001; Grezes & Decety, 2001). L'observation de mouvements biologiques activerait donc automatiquement dans le cerveau de l'agent observateur les aires motrices de son cortex cérébral puisque ce dernier serait amené à simuler les mouvements perçus (Keysers & Gazzola, 2006; Rizzolatti & Craighero, 2004).

Découverts la première fois dans le cortex prémoteur ventral du singe (Gallese et al., 1996; Rizzolatti et al., 1988), ces neurones s'activaient lorsqu'un macaque réalisait une action et lorsqu'il observait cette même action réalisée par un de ses congénères ou un être humain. L'existence d'un réseau similaire neuronal chez l'être humain a été mise en évidence via les travaux de neurophysiologie et d'imagerie cérébrale (e.g., Buccino et al., 2001, 2004; Calmels et al., 2006; Cochin et al., 1999; Fadiga et al., 1995; Grèzes et al., 2003; Iacoboni et al., 1999; Nishitani & Hari, 2000). Plus particulièrement, les travaux en neuroimagerie ont identifié les bases anatomiques du SNM (e.g., Buccino et al., 2001, 2004; Dinstein, 2007; Gangitano et

al., 2001; Grèzes et al., 2003; Iacoboni et al., 1999, 2005). La partie antérieure du sillon frontal inférieur, le cortex prémoteur ventral, le sillon intraparietal antérieur, supérieur, et postérieur ont été reconnus comme des régions possédant des propriétés miroires, c'est-à-dire des régions actives durant l'observation et l'exécution d'actions. Très récemment, il a également été montré que les cortice somatosensoriels primaire et secondaire, et plus spécifiquement l'aire de Brodmann 2 (BA2), jouaient un rôle dans la perception et l'exécution d'actions transitives (Dinstein et al., 2007; Gazzola & Keysers, 2009; Ricciardi et al., 2009; Turella et al., 2009).

Ce SNM chez l'être humain possède des caractéristiques particulières. Par exemple, il est peu impliqué lorsque l'action observée est réalisée par un agent non biologique (Perani et al., 2001). Il n'est pas sollicité lorsque l'action regardée est impossible à exécuter d'un point de vue biomécanique (Stevens et al., 2000) ou n'appartient pas au répertoire moteur de l'observateur (Buccino et al., 2004). Le niveau d'expertise de l'observateur influe également sur ce système (Calvo-Merino et al., 2005, 2006; Reid et al., 2005). Des activations bilatérales plus importantes du cortex prémoteur, du cortex pariétal, et du sillon temporal supérieur (STS) ont été relevées chez des danseurs experts lors de l'observation de prestations habituellement réalisées par ces sujets alors que pour des mouvements n'appartenant pas à leur répertoire gestuel, ces activations étaient moindres.

Dans le champ de la neurologie, il a été montré que des déficits au niveau des sensations périphériques (Bosbach et al., 2005), des lésions du système moteur (Pavlova et al., 2003; Pazzaglia et al., 2008; Serino et al., 2010), ou des douleurs chroniques (Schoebel et al., 2001, 2002) affectaient profondément les performances

lors de tâches de reconnaissance. Par exemple, Bosbach et al. (2005) ont établi que deux sujets ayant perdu le sens du toucher et de la proprioception étaient incapables d'interpréter les expectations d'une tierce personne qui était observée en train de soulever des boîtes de taille et de poids différents. D'une part, comprendre les expectations d'autrui suite à l'observation de leurs actions nécessiterait pour l'agent observateur de simuler mentalement ces actions donc d'accéder à une représentation motrice interne de l'action. D'autre part, les sensations périphériques seraient également nécessaires dans ce processus et permettraient de mettre à jour cette représentation motrice qui, sans cette réactualisation, serait amenée à s'estomper au cours du temps.

A notre connaissance, aucune recherche n'a examiné si l'incapacité temporaire d'un agent observateur de réaliser certaines actions permettait l'accès aux représentations motrices de ces actions. Tel a été le but de cette étude.

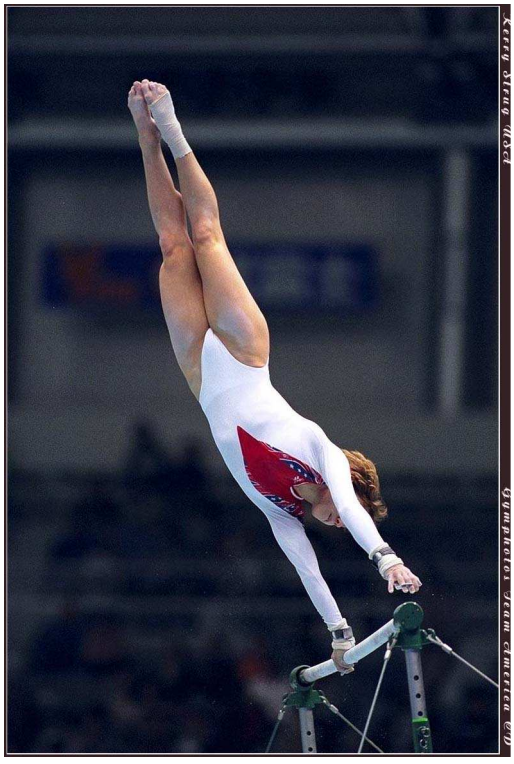
Les sujets ont été recrutés chez une population féminine de gymnastes expertes. Ce choix s'est expliqué par la spécificité de la gymnastique artistique. C'est une des rares discipline sportives où un/une athlète souffrant d'un traumatisme physique peut poursuivre son entraînement en réalisant des mouvements ne sollicitant pas la partie du corps blessée. L'activité cérébrale hémodynamique des gymnastes a été enregistrée à deux reprises. Lors du premier examen par IRM, c'est-à-dire lorsque les gymnastes étaient blessées, elles ont observé des mouvements qu'elles étaient incapables temporairement de réaliser et des mouvements qu'elles étaient capables d'exécuter. Lors du second examen par IRM, les gymnastes, étaient rétablies. Elles ont regardé des mouvements qu'elles étaient en mesure de réaliser. Ce protocole a permis d'examiner si une simulation motrice se produisait lorsque les sujets étaient

momentanément dans l'incapacité de réaliser certaines actions. En d'autres termes, le SNM s'activait-il lorsque les gymnastes étaient blessées et la blessure avait-elle un impact spécifique sur les régions activées lors de l'observation de mouvements réalisables ou présentement non réalisables? Ce protocole a également autorisé l'investigation des régions corticales impliquées lors de l'observation, chez un même individu lorsque celui-ci souffrait d'un traumatisme physique temporaire et lorsque ce dernier était rétabli.

METHODOLOGIE

Sujets

Treize gymnastes féminines expertes ne présentant aucun antécédent neurologique ou psychiatrique (M = 19.9, SD = 3.4) ont pris part à l'étude de manière volontaire. Le recrutement a été réalisé au niveau national et les critères d'inclusion étaient multiples. Premièrement, ces gymnastes devaient évoluer au niveau national et devaient être capables de réaliser : (i) au sol, un salto tendu avant vrillé, un salto arrière tendu vrillé et (ii) aux barres asymétriques, une bascule équilibre, un passement filé dégagé à l'oblique haute, des soleils, et des lunes. Ces exercices étaient les stimuli employés dans la présente étude. Deuxièmement, elles devaient être temporairement dans l'incapacité de réaliser certains mouvements qui étaient maîtrisés avant le traumatisme.



Plus spécifiquement, ces gymnastes étaient blessées au membre inférieur au début de l'expérimentation. Le type de traumatisme était de nature identique pour tous les sujets et a été qualifié de modéré, c'est-à-dire qu'il a nécessité un «arrêt partiel» de la pratique gymnique de deux à trois mois. Pendant ce laps de temps, les gymnastes blessées au membre inférieur n'ont pu réaliser des exercices sollicitant cette partie du corps (i.e., sol, poutre, et saut de cheval) mais ont pu exécuter des exercices requérant le membre supérieur (i.e., barres asymétriques). La gymnastique est une des rares disciplines sportives où l'athlète peut poursuivre partiellement l'entraînement même en étant blessé et ceci sans porter préjudice à son intégrité physique. Dans le cas de la présente étude, les gymnastes étaient blessées au pied (n = 2), à la cheville (n = 7), et au genou (n = 4). Les pathologies étaient des entorses (n = 10), des luxations (n = 1), et des fractures (n = 2).

Le sens de rotation lors de l'exécution des salti vrillés a été évalué pour chaque sujet. Dix gymnastes réalisaient ces figures à gauche, une à droite, et deux ont présenté des latéralités variables en fonction des figures. Pour la réalisation de ces figures dans les espaces arrière et avant, ces deux gymnastes privilégiaient respectivement un sens de rotation à gauche et à droite.

L'ensemble de ces sujets ont reçu préalablement une lettre d'information et ont rempli un formulaire de consentement, au même titre que les parents/tuteurs légaux des sujets mineurs. Cette étude a reçu l'avis favorable du Comité de Protection des Personnes (CPP) de l'Ile de France VI et l'accord de la Direction Générale de la Santé (DGS 2006-0065) pour sa réalisation. Chacun des sujets a été soumis à un entretien avec un médecin afin de vérifier l'absence de contre-indications aux examens par résonance magnétique fonctionnelle. Les sujets majeurs ont perçu une indemnisation de 40 Euros/heure.

Stimuli

Trois gymnastes de haut niveau, ne participant pas à la présente étude, ont été filmées. Leur sens de rotation (préférentielle) était anti-horaire. En d'autres termes, ces jeunes filles réalisaient les rotations longitudinales à gauche. Elles portaient un juste-au-corps identique de couleur bleu marine et ont réalisé des mouvements, impliquant de façon dominante soit les membres supérieurs (i.e., mouvements aux barres asymétriques), soit les membres inférieurs (i.e., mouvements au trampoline).

Dans le cadre de cette étude, les mouvements réalisés au trampoline ont consisté à réaliser des chandelles suivies d'une figure acrobatique avec une arrivée en fosse. Pour plus de commodités, ces exercices ont été nommés, dans la suite de ce manuscrit, «mouvements au sol.» En d'autres termes, les mouvements au trampoline/sol sont caractérisés par une poussée des jambes dans la toile et solliciteraient de façon dominante les membres inférieurs. Les exercices aux barres asymétriques, essentiellement réalisés en suspension ou en appui manuel, requerraient, eux, de façon privilégiée l'utilisation des membres supérieurs. Les connaisseurs qualifient d'ailleurs cet agrès «d'agrès de bras.»

Ces trois gymnastes ont exécuté un certain nombre de mouvements aux barres asymétriques et au sol. L'arrière plan était uniforme et de teinte jaune pâle. Douze mouvements ont été sélectionnés (6 aux barres asymétriques et 6 au sol, voir Annexe 1). Les durées des vidéos des mouvements aux barres asymétriques étaient comprises entre 3520 et 7240 ms alors qu'au sol, les durées s'échelonnaient de 3040 à 5640 ms (voir Annexe 1). Des photos (images statiques) représentant soit le début, soit le milieu ou la fin des mouvements ont également été extraites à partir des vidéos réalisées aux barres asymétriques et au sol. La durée de présentation de ces images statiques était similaire à la durée des vidéos dont elles étaient issues. La réalisation de vidéos et de photos de mouvements a permis de distinguer deux types de stimuli : des stimuli dynamiques (DYN) et des stimuli statiques (STAT). Présenter des images statiques avait pour but de constituer une condition contrôle ou de référence par rapport à nos conditions d'intérêts afin d'éliminer les régions cérébrales impliquées dans l'analyse visuelle de bas niveau (i.e., analyse de la scène visuelle : couleur, luminosité, postures sans mouvement etc..). La soustraction de cette condition contrôle aux autres conditions a ainsi permis d'identifier l'ensemble des régions cérébrales spécifiquement impliquées dans toutes nos conditions d'intérêts et jouant un rôle dans la perception du mouvement d'autrui.

Un autre type de vidéo a été édité. Six mouvements aux barres asymétriques et au sol, différents des 12 mouvements sélectionnés précédemment, ont également été retenus et ont servi de stimuli pour le paradigme oddball. Ces oddballs se caractérisaient par l'apparition d'un point rouge au milieu de l'écran 1000ms après le début de la vidéo. Ce point restait visible pendant 1000ms avant de disparaître de l'écran. Les sujets devaient appuyer sur un bouton réponse lors de l'identification de ces stimuli. Cette tâche a permis de disposer d'une tâche motrice contrôle et nous a

permis de contrôler l'état attentionnel des sujets. La durée des stimuli oddball étaient comprises entre 3440 et 5640ms (voir Annexe 1). Des évènements nuls (i.e., écrans noirs) d'une durée de 4500ms ont également été produits. L'ensemble des stimuli s'est donc composé de : (i) 18 vidéos au sol (6 mouvements réalisés par les trois gymnastes), (ii) 18 vidéos aux barres asymétriques (6 mouvements réalisés par les trois gymnastes), (iii) 18 images statiques au sol, (iv) 18 images statiques aux barres asymétriques, (v) 16 oddballs (éléments réalisés soit par deux ou trois gymnastes), et (vi) 36 évènements nuls. Ces stimuli ont été présentés deux fois.

Toutes les vidéos ont été «inversées» afin d'obtenir un «effet miroir» comme si la vidéo du mouvement se reflétait dans un miroir. Cette opération a été réalisée avec le logiciel «after-effect» et a permis de proposer aux gymnastes des vidéos de mouvements correspondant à leur sens de rotation lors de l'exécution de salti vrillés. Quatre packages ont donc été conçus : (i) un package «rotations à gauche» (rotations longitudinales réalisées à gauche), (ii) un package «rotations à droite» (rotations longitudinales réalisées à droite), (iii) un package «mixte 1» (rotations longitudinales arrières à gauche & rotations longitudinales avants à droite), et (iv) un package «mixte 2» (rotations longitudinales arrières à droite & rotations longitudinales avants à gauche).

Procédure Expérimentale

La procédure expérimentale était composée de deux étapes : une étude pilote et deux examens par IRM (Imagerie par Résonance Magnétique).

Etude Pilote

L'étude pilote a eu pour but de valider les stimuli utilisés dans la présente étude. Dix gymnastes féminines, n'ayant pas participé à l'étude, ont été invitées à visionner les vidéos au sol et aux barres asymétriques. Ces gymnastes devaient juger si (i) les mouvements présentés impliquaient un usage prédominant du membre inférieur ou supérieur et si (ii) une blessure au membre inférieur ou supérieur entravait la réalisation du mouvement. Une échelle de Likert en 10 points a été utilisée et les sujets devaient, en déplaçant un curseur sur cette échelle en 10 points, donner leur avis sur ces questions (0 pour désaccord complet et 10 pour accord complet) (voir Annexe 2).

Examen par IRM

Les gymnastes, ayant rempli les critères d'inclusion de la présente étude, ont été scannées à deux reprises. La première session s'est déroulée lorsqu'elles étaient blessées et plus spécifiquement un mois après la survenue du traumatisme. Lors de cette période, un arrêt partiel de la pratique gymnique a été observé. Les gymnastes blessées au membre inférieur n'ont pas réalisé des exercices sollicitant cette partie du corps (i.e., exercices au sol), mais elles se sont adonnées à la pratique des exercices requérant le membre supérieur (i.e., exercices aux barres asymétriques). La seconde session a eu lieu lorsque les gymnastes étaient rétablies c'est-à-dire lorsqu'elles étaient dans la capacité de reprendre un entraînement au sol (voir Figure 1). La durée moyenne entre les deux examens par IRM a été de six mois.

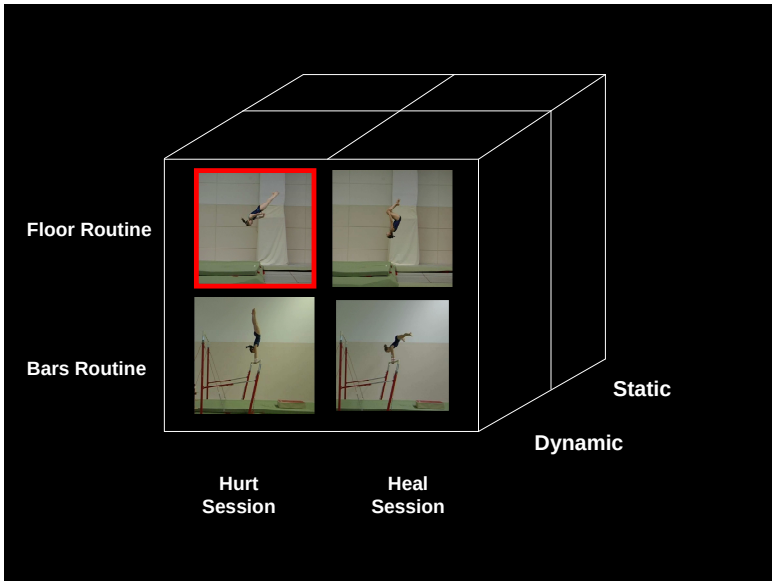


Figure 1. Design Expérimental et Exemples de Stimuli Utilisés dans cette Etude

Avant l'examen par IRM, les gymnastes ont reçu un certain nombre d'instructions : (i) rester immobile dans le scanner, (ii) observer passivement les vidéos des mouvements, et (iii) presser avec leur pouce droit un bouton réponse lors de l'apparition d'un point rouge au milieu de l'écran. Elles ont également été conviées à un entraînement, à l'extérieur du scanner, afin de se familiariser avec la procédure expérimentale. Pour résumer, lors du premier examen par IRM, les gymnastes ont regardé des mouvements aux barres qu'elles étaient en mesure de réaliser et des

mouvements au sol qu'elles étaient dans l'impossibilité d'exécuter. Lors du second examen par IRM, les gymnastes étaient rétablies et pouvaient effectuer physiquement l'ensemble des mouvements observés.

Les stimuli ont été présentés deux fois selon un protocole évènementiel. Lors de l'examen par IRM, 248 (i.e., 2 x 124) stimuli ont été ainsi visionnés : (i) 36 vidéos au sol et aux barres asymétriques (29.03% des stimuli), (ii) 36 images statiques au sol et aux barres asymétriques (29.03% des stimuli), (iii) 16 oddballs (12.90% des stimuli), et (iv) 36 évènements nuls (29.03% des stimuli). La présentation de ces stimuli a été randomisée. 1000ms séparaient deux stimuli et durant ce laps de temps, un écran noir était visible.

Acquisition des Données IRMf

Les données ont été acquises par un imageur IRM 3Teslas (3T TRIO TIM, Siemens, CENIR, Pitié-Salpêtrière, France). Deux types d'acquisition ont été réalisés : une acquisition de données fonctionnelles et une acquisition de données anatomiques.

Les données fonctionnelles ont été obtenues avec une séquence en écho-planar (EPI) pondérée en T2. Les paramètres étaient les suivants : (i) TR (temps de répétition) = 2080ms, (ii) TE (temps d'écho) = 30ms, (iii) FOV (champ de vue) = 192mm, (iv) flip angle = 90, (v) matrice 64 x 64 (matrice d'acquisition), (vi) 32 coupes axiales per slab, (vii) épaisseur des coupes = 3mm, (viii) gap de 33%, et (ix) taille des voxels = 3 x 3 x 3mm. Une procédure de shimming a été réalisée pour compenser les défauts d'inhomogénéité du champ magnétique statique. Au total, 680 volumes ont été acquis pour chaque sujet. Les cinq premiers volumes et le dernier volume n'ont pas été pris en considération dans l'analyse de permettre l'effet d'équilibration en T1. Chaque volume comprenait 32 coupes axiales parallèles au plan bi-commissural AC-PC (commissure antérieure – commissure postérieure) et acquises séquentiellement de manière ascendante et en mode entrelacé.

Les données anatomiques ont été pondérées en T1. Les paramètres étaient les suivants : (i) TR = 2300ms, (ii) TE = 4.18ms, (iii) FOV = 256mm, (iv) flip angle = 9, (v) matrice 256 x 256, (vi) 176 coupes sagittales per slab, (vii) épaisseur des coupes = 1mm, (viii) gap de 50%, et (ix) taille des voxels = 1 x 1 x 1mm.

Prétraitement des Données IRMf

L'analyse des images IRM a été effectuée avec le logiciel standard d'analyse statistique des activations cérébrales SPM2 (Statistical Parametric Mapping, http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/software/spm) implémenté sous Matlab 7.0.1. Premièrement, les images ont été corrigées temporellement. Elles ont été recalées sur la coupe du milieu du volume c'est-à dire sur la coupe acquise à la moitié du TR. Deuxièmement, les images ont été réalignées en utilisant comme référence les images du premier volume. Troisièmement, la variabilité anatomique inter-individuelle étant non négligeable, ces images ont été normalisées spatialement par rapport au repère du Montréal Neurological Institute (i.e., repère MNI). Finalement, les images ont été lissées par un filtre isotropique FWHM (Full-Width-Half-Maximum) de 8mm afin d'améliorer le rapport signal sur bruit et de diminuer les variabilités anatomiques inter-individuelles résiduelles.

Analyses Statistiques des Données IRMf

Les analyses statistiques ont été réalisées en utilisant le Modèle Linéaire Généralisé (Statistical Parametric Mapping 2, SPM2, Wellcome Department of Imaging Neuroscience, London, UK).

A un premier niveau d'analyse, une analyse intra-sujet a été menée. Pour chaque session [i.e., session où les gymnastes étaient blessées (HURT) et session où les gymnastes étaient rétablies (HEAL)], les six conditions suivantes ont été modélisées : 2 conditions où les sujets observaient les vidéos des mouvements aux barres asymétriques et au sol (BARRES DYN et SOL DYN), 2 conditions où les sujets regardaient les photos des mouvements aux barres asymétriques et au sol (BARRES STAT et SOL STAT), 1 condition Oddball, et 1 condition Réponse Motrice au cours de laquelle les sujets appuyaient sur un bouton réponse à chaque fois qu'ils percevaient un point rouge au centre de l'écran. Les évènements nuls ont été modélisés implicitement. Pour chaque condition, les temps d'apparition des stimuli ont été convolués à la fonction de réponse hémodynamique (HRF) et à sa dérivée afin de modéliser la variation du signal BOLD. Six autres co-variables ont été modélisées afin de prendre en compte les artéfacts résiduels issus des mouvements de la tête (3 translation du corps rigide et 3 rotations déterminées à partir de l'enregistrement spatial initial). Une dernière co-variable représentant la moyenne du signal BOLD sur

l'ensemble des images acquises a été modélisée. Les données ont été filtrées à 1/128Hz à l'aide d'un filtre passe-haut.

A un second niveau d'analyse, un modèle à effet randomisé ou à effet aléatoire a été utilisé. Dans ce modèle, l'analyse réalisée a permis de prendre en compte la variabilité inter-individuelle et de généraliser les résultats à la population entière. Une 2 x 2 x 2 [session (Hurt, Heal), caractéristique (Dyn, Stat), mouvement (Barres, Sol)] ANOVA à mesures répétées (ANOVA intra-sujets) a été réalisée.

Dans un premier temps, après avoir estimé le modèle, une conjonction entre les contrastes suivants [(Bars Dyn vs. Bars Stat) Heal] ∩ [(Floor Dyn vs. Floor Stat) Heal] ∩ [(Bars Dyn vs. Bars Stat) Hurt] ∩ [(Floor Dyn vs. Floor Stat) Hurt] a été réalisée. Le but était d'identifier les régions communes qui s'activaient lorsque des vidéos de mouvements aux barres et au sol étaient observées que les gymnastes soient blessées ou rétablies. Parmi l'ensemble des aires détectées lors du calcul de la conjonction, seules les régions reconnues pour appartenir au système des neurones miroirs et pour être impliquées dans la construction et le maintien des représentations motrices (Dinstein et al., 2007, 2008) ont été retenues. Ces aires ont constitué les régions d'intérêt (RI) et une analyse sur ces RI a été menée. Les analyses menées étant très conservatives, les cartes statistiques paramétriques ont été restreintes à k = 10 voxels avec $p < .005$ (non corrigé). Ces cartes ont été superposées à la référence MNI et légendées à l'aide de l'atlas de Duvernoy (Duvernoy, 1999) et de la boîte à outils d'anatomie de SPM2.

Dans un second temps, les valeurs des paramètres estimés pour le pic du voxel considéré au sein de chaque RI (i.e., valeurs bêtas sous Matlab) ont été calculées pour chaque sujet et ont fait l'objet d'analyses statistiques. Plus spécifiquement, pour chaque RI, une 2 x 2 [session (Hurt, Heal), mouvement (Barres Dyn, Sol Dyn)] ANOVA à mesures répétées a été réalisée sur les paramètres estimés afin d'examiner si les facteurs «Session» et «Mouvement» interagissaient significativement. Des post-hocs (tests de Bonferroni) ont été appliqués lorsque les résultats des ANOVAs se sont révélés être significatifs. La normalité de la distribution des données a été également vérifiée à l'aide du test de Kolmogorov-Smirnov. L'hypothèse de la sphéricité a été contrôlée via le test de Mauchley. Dans le cas où les données ne remplissaient pas ces deux pré-requis, des tests non paramétriques ont été employés (i.e., ANOVA de Friedman et test de Wilcoxon avec une correction de Bonferroni comme post-hoc).

Pour pallier aux problèmes des comparaisons multiples (i.e., inflation dans l'erreur de type I), le seuil alpha, pour les tests de Wilcoxon, a été corrigé et une différence s'avérait significative si $p < .0125$; quatre comparaisons ayant été examinées (i.e., Bar Dyn Hurt vs Floor Dyn Hurt, Bar Dyn Heal vs Floor Dyn Heal, Bar Dyn Hurt vs Bar Dyn Heal, Floor Dyn Hurt vs Floor Dyn Heal). Les comparaisons post-hocs ont permis de tester l'impact de la blessure sur le niveau d'activation des RI. Toutes les analyses ont été faites avec le logiciel Statistica 7.1.

RESULTATS

Résultats Comportementaux

Les scores pour vérifier si les mouvements au sol sollicitaient un usage prédominant du membre supérieur (6.95/10) ou du membre inférieur (9.36/10) étaient statistiquement différents ($t(5) = -8.855$, $p = .000305$). Les gymnastes ont perçu les exercices au sol/trampoline comme impliquant plus l'usage des jambes que des bras. Pour les mouvements aux barres, une différence significative a également été observée (membre supérieur : 9.57/10 vs membre inférieur : 6.26/10; $t(5) = 16.911$, $p = .000013$). Les gymnastes ont reconnu que les exercices aux barres sollicitaient plus les bras que les jambes. Les scores pour évaluer si une blessure au membre inférieur entravait la réalisation des mouvements aux barres (7.89/10, pas d'entrave) et des mouvements au sol (0.49/10, entrave) ont montré une différence significative ($t(5) = -24.627$, $p = .000002$). Les gymnastes ont estimé qu'une blessure à la cheville, à la jambe ou au genou permettait de poursuivre l'entraînement aux barres alors que la réalisation d'exercices au sol/trampoline n'était pas possible. Une différence statistiquement significative a été relevée pour une blessure au membre supérieur (mouvements aux barres : 0.35/10 (entrave) vs mouvements au sol : 8.66/10 (pas d'entrave); $t(5) = 25.203$, $p = .000002$). Les gymnastes ont jugé qu'une blessure à la

main, à l'avant bras ou au coude ne gênait pas l'entraînement au sol/trampoline alors qu'exécuter des exercices aux barres était infaisable.

Résultats IRMf

Conjonction entre [(Bars Dyn vs. Bars Stat) Heal] ∩ [(Floor Dyn vs. Floor Stat) Heal] ∩[(Bars Dyn vs. Bars Stat) Hurt] ∩ [(Floor Dyn vs. Floor Stat) Hurt]

Cette analyse a identifié des activations corticales communes lors de l'observation de mouvements aux barres et au sol dans les régions d'intérêt (ROI; i.e., régions appartenant au système des neurones miroirs et impliquées dans la perception de mouvements biologiques), et ce quelque soit l'état de santé, de forme des gymnastes. Plus particulièrement, des activations au niveau du gyrus précentral, de l'aire motrice supplémentaire (AMS), du gyrus postcentral, du cortex cingulaire moteur, du lobe pariétal inférieur et supérieur, du sillon temporal supérieur (STS), du gyrus fusiforme, et du cervelet ont été relevées. Un détail de ces activations est présenté dans la Table 1.

Table 1. Activations corticales communes lors de l'observation de mouvements aux barres et au sol dans les régions d'intérêt mises en évidence par la conjonction entre [(Bars Dyn vs. Bars Stat) Heal] ∩ [(Floor Dyn vs. Floor Stat) Heal] ∩ [(Bars Dyn vs. Bars Stat) Hurt] ∩ [(Floor Dyn vs. Floor Stat) Hurt] ($p < .005$, non corrigé ; taille minimale des clusters supérieure à 10). Seules les régions d'intérêt ont été reportées. Les valeurs de *p* pour l'interaction Session x Mouvement sont communiquées. (NS : Non Significatif)

Anatomical Regions	MNI Coordinates			T Scores	Z scores	Voxel Sizes	*p* Values
	x	y	z				
RightPrecentral Gyrus (BA44)	54	12	34	3.26	3.15	564	NS
RightPrecentral Gyrus (BA6)	44	2	46	4.74	4.45	564	NS
Right SMA (BA6)	8	-4	74	4.12	3.92	233	.031
Left SMA (BA6)	-2	-4	72	3.47	3.35	233	.0036
Right Postcentral Gyrus (BA2)	28	-40	50	3.69	3.54	194	.025
Right Postcentral Gyrus	14	-54	74	3.89	3.72	121	NS
Left Postcentral Gyrus (BA1)	-36	-42	68	3.11	3.02	47	NS
Left Postcentral Gyrus (BA3b)	-12	-54	68	4.10	3.90	86	NS
Right Motor Cingulate Cortex	16	-28	44	5.22	4.85	203	NS

Left Motor Cingulate Cortex	-12	-22	42	5.82	5.32	124	.032
Left Inferior Parietal Lobule (SMG)	-50	-38	28	4.68	4.40	360	NS
Right Inferior Parietal Lobule (SMG)	62	-40	22	7.19	6.33	3654	NS
Right Superior Parietal Lobule	38	-48	66	3.01	2.93	194	NS
Right STS	54	-46	10	5.56	5.11	3654	.048
Left STS	-56	-56	12	5.95	5.42	2665	.025
Right Fusiform Gyrus	42	-50	-18	3.29	3.18	67	.0073
Left Fusiform Gyrus	-44	-66	-16	3.16	3.06	2665	.0035
Left Cerebelum (VI)	-36	-70	-22	3.10	3.01	2665	NS
Left Cerebelum (VI)	-12	-70	-22	3.62	3.48	32	NS
Right Cerebellum (Crus 1)	42	-54	-28	3.16	3.06	67	NS
Left Cerebellum (Crus 1)	-36	-52	-32	3.89	3.72	53	NS

Les ANOVAs à mesures répétées sur les valeurs des paramètres estimés ont révélé des interactions significatives Session x Mouvement (voir Table 1) pour : (i) l'AMS droite (BA6) (Chi2 ANOVA (N=13,dl=3) = 8.908, p = .031), (ii) l'AMS gauche (BA6) (Chi2 ANOVA (N=13,dl=3) = 13.523, p = .0036), (iii) le gyrus postcentral droit (BA2) (Chi2 ANOVA (N=13,dl=3) = 9.369, p = .025), (iv) le cortex cingulaire moteur gauche (F(1,12) = 5.851, p < .032), (v) le STS droit (F(1,12) = 4.856, p < . 048), (vi) le STS gauche (F(1,12) = 6.581, p < .025), (vii) le gyrus fusiforme droit (Chi2 ANOVA (N=13,dl=3) = 12.023, p = .0073), et(viii) le gyrus fusiforme gauche (F(1,12) = 13.1, p < 0035).

Les analyses post-hocs ont mis en évidence trois résultats (voir Figure 2).

Premièrement, lorsque les gymnastes étaient blessées, le niveau d'activation au sein de l'AMS droite (BA6), du gyrus postcentral droit (BA2), et du cortex moteur cingulaire gauche était plus élevé lors de l'observation des mouvements aux barres comparé au niveau d'activation relevé lors de l'observation des mouvements au sol (p < .015 pour l'AMS et le gyrus postcentral, p < .003 pour le cortex moteur cingulaire). Deuxièmement, les gymnastes blessées ont présenté des activations au sein du STS droit et du gyrus fusiforme droit plus faibles lors de l'observation des mouvements aux barres comparativement aux activations mises en évidence lors de l'observation des mouvements au sol (p < .003 pour le STS, p < .015 pour le gyrus fusiforme).

Enfin, l’activation du STS gauche et du gyrus fusiforme gauche était supérieure lorsque les gymnastes blessées regardaient les mouvements au sol comparé à l’activation se produisant lors du visionnage des mouvements aux barres ($p < .003$ pour le STS, $p < .04$ pour le gyrus fusiforme). Dans ces mêmes régions lors de l’observation des mouvements au sol, une activation plus importante a été décelée lorsque les gymnastes souffraient d’une blessure au membre inférieur par rapport à l’activation observée six mois plus tard lorsqu’elles étaient rétablies ($p < .04$ pour le STS, $p < .003$ pour le gyrus fusiforme)

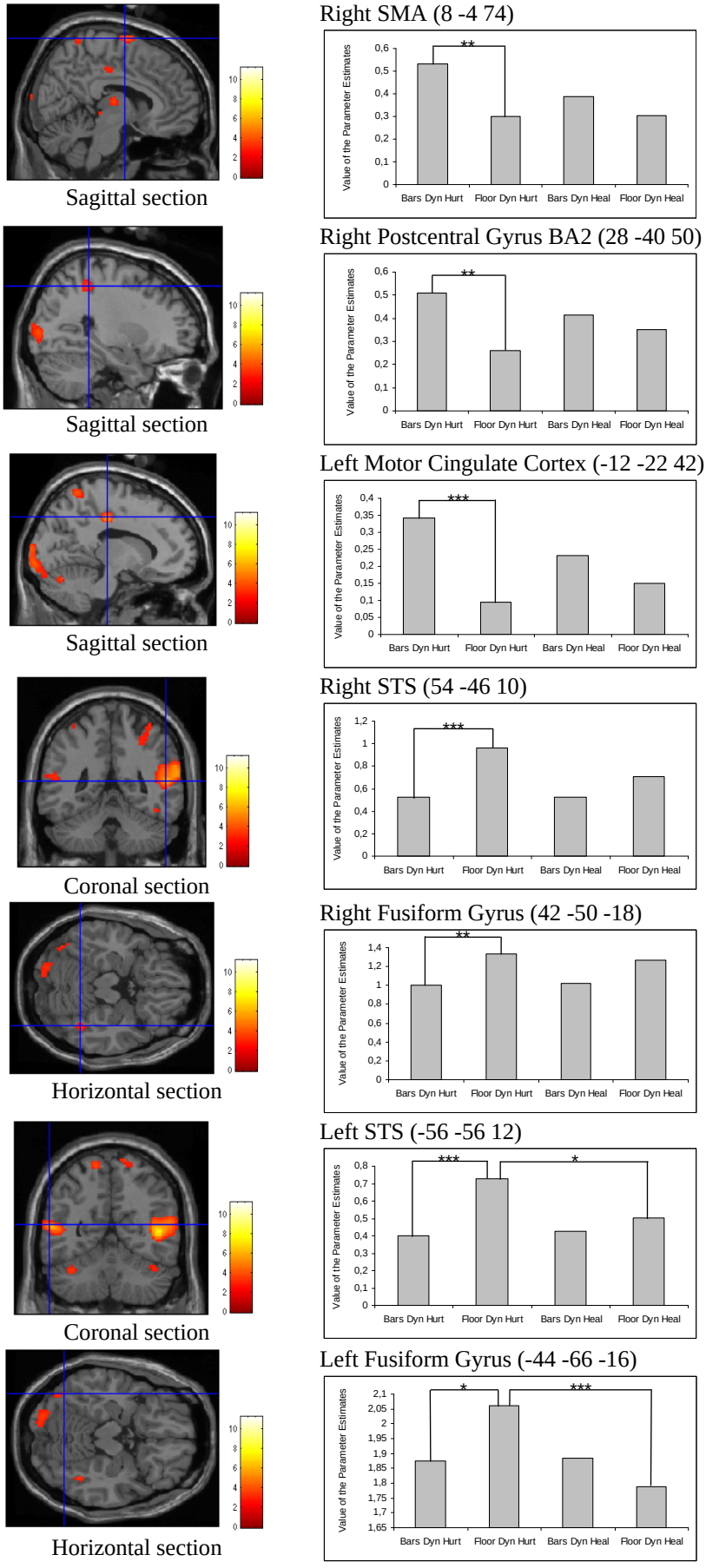


Figure 2. Common activations during the observation of bars and floor routines irrespective of the

subjects'state of health which display amplitude differences. Column 1: Group (n = 13) average activation of the right SMA, the right postcentral gyrus, the left motor cingulated cortex, the STS, and the fusiform gyrus superimposed on coronal, sagittal, and horizontal sections of the MNI brain. Column 2: Histograms represent the percentage signal change at the local maxima within these regions across conditions. Asteriks (*) indicate statistically significant difference (* $p < .04$; ** $p < .015$; *** $p < .003$)

DISCUSSION

Le but de cette recherche était d'examiner si l'incapacité temporaire d'un agent observateur de réaliser certaines actions permettait l'accès aux représentations de ces actions. Les résultats ont mis en évidence que cette incapacité avait des incidences sur le niveau d'activation de certaines régions du SNM peu reconnues comme possédant des propriétés miroires et de ce fait bien souvent ignorées par la littérature (Gazzola & Keysers, 2009). Plus précisément, l'AMS, le gyrus postcentral (BA2), et le cortex moteur cingulaire étaient moins activés lorsque les sujets étaient blessés et observaient des mouvements au sol qu'ils n'étaient provisoirement pas capables d'exécuter. Inversement, il a été révélé que le STS et le gyrus fusiforme étaient plus activés. De tels résultats n'ont pas été constatés lors de l'observation de mouvements que les gymnastes étaient en mesure de réaliser (i.e., mouvements aux barres asymétriques).

La discussion est organisée en trois sections. La première section considère les résultats concernant la région du gyrus postcentral ou région somatosensorielle (BA2). La seconde section est consacrée à l'AMS et au cortex moteur cingulaire. Enfin, une dernière section s'est intéressée au STS et au gyrus fusiforme.

Aire Somatosensorielle, Gyrus Postcentral BA2

Les résultats ont montré chez les gymnastes blessées une activation plus faible au sein de l'aire postcentrale BA2 lors de l'observation de mouvements que ces gymnastes étaient dans l'incapacité de réaliser comparée à l'observation de mouvements que ces mêmes sujets pouvaient exécuter. Détecter une activation au sein du gyrus postcentral BA2 n'est pas un résultat surprenant et ce pour plusieurs raisons. Premièrement, l'aire somatosensorielle BA2 a été reconnue récemment comme faisant partie du réseau du SNM (Dinstein, 2007; Keysers et al., 2010). Deuxièmement, BA2 entretient des connexions directes et réciproques avec les aires pariétales (Pons & Kaas, 1986; Rozzi et al., 2006. voir pour une revue de littérature Keysers et al., 2010) et le cortex prémoteur au sein duquel sont hébergés les neurones miroirs (Gallese et al., 1996; Rozzi et al., 1998). Troisièmement, BA2 contient plus de «voxels partagés» que le cortex prémoteur ventral (Gazzola & Keysers, 2009). Le terme de «voxels partagés» a été préféré à celui de «neurones miroirs.» Gazzola et Keysers (2009) ont, en effet, préconisé cette utilisation dans un souci de précision et de clarté. Si lors de l'observation et de l'exécution d'actions, le signal BOLD augmente au sein de certains voxels, ces voxels sont désignés par le terme de «voxels partagés.» Ces voxels peuvent être de trois types. Premier type : Ils peuvent contenir des populations distinctes de neurones. Une population spécifique s'activera alors lors d'actions observées et une population différente lors de l'exécution de ces mêmes actions. Deuxième type : ils sont composés uniquement de neurones miroirs. Ce pool de neurones s'activera lors de l'observation et lors de l'exécution d'actions. Troisième type : ces voxels hébergent les deux types de populations neuronales décrites ci-dessus. De plus, dans la littérature, le terme de «neurones miroirs» est bien souvent associé au système moteur. Dans le cas où un voxel serait recruté en dehors de ce système lors de l'observation et de l'exécution d'actions, Gazzola et Keysers (2009, p.1239) ont opté pour l'emploi d'un terme plus neutre qui leur a semblé plus approprié.

L'activation dans les aires somatosensorielles pendant l'observation d'actions reflèterait la représentation des états somatiques (i.e., «what it feels like») qui seraient

associés à la réalisation, à la performance de l'action perçue (Keysers et al., 2010). Un mécanisme similaire a été mis en avant pour expliquer comment la perception des états émotionnels d'autrui participait à leur compréhension (Banissy, 2010; Heberlein et al., 2004; Jackson et al., 2005; Keysers et al., 2004; Pitcher et al., 2008; Pourtois et al., 2004; Singer et al., 2004; Wicker et al., 2003).

La diminution d'activation au sein de BA2 exprimerait l'absence de feedback sensoriel. Lorsque les sujets étaient blessés, ils ne réalisaient plus physiquement les mouvements au sol et donc le feedback associé à cette pratique n'était plus généré. A ce sujet, Bosbach et al. (2005) et d'autres (e.g., de Jong et al., 2002; Naito et al., 2005) ont insinué que le feedback sensoriel était nécessaire pour accéder et mettre à jour les représentations motrices et que sans ce feedback, ces représentations seraient amenées à s'estomper au cours du temps. Les résultats de la présente étude ont montré que l'absence de feedback associée à l'incapacité motrice temporaire affectait le niveau d'activité au sein du cortex somatosensoriel sans influer sur l'activité des cortices prémoteur latéral et pariétal, siège des représentations motrices. Ce constat est consistent avec les résultats de Beudel et al. (2011). Ils ont révélé que l'aire somatosensorielle SII n'était pas activée lors de l'observation d'actions non familières que les sujets n'étaient pas en mesure d'effectuer. Un résultat similaire a été montré lorsque ces mêmes sujets étaient invités à simuler mentalement ces actions via l'imagerie motrice. Le faible niveau d'activation observé dans la présente étude plutôt que l'absence d'activation, mise en évidence par Beudel et al. (2011), peut s'expliquer par le haut niveau d'expertise des sujets. En effet, ces sujets ont à leur actif au minimum dix années de pratique gymnique et il est actuellement reconnu dans la communauté scientifique qu'un haut degré d'expertise motrice influe directement sur la mise en jeu du SNM chez l'être humain (Calvo-Merino et al., 2005, 2006; Cross et

al., 2006). De plus, en tenant compte du modèle proposé par Gazzola et Keysers (2009), qui est basé sur la théorie de l'apprentissage Hebbien (Hebb, 1949) et des modèles internes du contrôle moteur (Miall, 2003; Wolpert et al., 1998, 2003), la diminution d'activation pourrait s'expliquer par le fait que la force de connexion entre deux évènements (ici moteur et sensoriel) dépendrait de leur degré d'activation. Plus la connexion est activée, plus elle sera renforcée et moins elle sera activée, moins elle se consolidera.

Pour conclure, il peut être proposé que la diminution d'activation de BA2 associée à une activation «normale» au sein du SNM classiquement reconnu par la littérature (i.e., cortices prémoteur et pariétal) permette l'activation de la représentation motrice d'une action perçue en l'absence d'expériences sensorimotrices. Des investigations complémentaires seraient nécessaires afin d'investiguer si des représentations sensorielles non réactualisées, c'est-à-dire en train de s'estomper, auraient une influence négative sur les performances de prédiction et d'anticipation des actions d'autrui comme cela est décrit chez des patients au niveau émotionnel ou dans les études de stimulation transcrânienne magnétique (Banissy, 2010; Heberlein et al., 2004; Pitcher et al., 2008; Pourtois et al., 2004).

AMS et Cortex Moteur Cingulaire

Bien que l'activité au sein des régions communément admises comme appartenant au SNM (i.e., cortices prémoteur latéral et pariétal) ne soit pas statistiquement différente, que les sujets soient capables où non de réaliser les mouvements observés, les réponses BOLD au niveau de l'AMS et du cortex moteur cingulaire sont plus faibles lors de l'observation de mouvements momentanément irréalisables. Il a été montré très récemment que l'AMS, reconnu comme étant

impliquée dans la programmation et la planification de comportements autogénérés, endogènes (Passingham, 1996), possédait des propriétés miroires (Gazzola & Keysers, 2009; Mukamel et al., 2010).

La réduction de son activation ainsi que celle du cortex moteur cingulaire peut être expliquée de deux façons. Premièrement, cette diminution peut être attribuée à l'affaiblissement de la connexion entre le cortex prémoteur latéral et le mur mésial. Cette suggestion est en accord avec les propositions avancées par Keysers et Gazzola (2009). Le mur mésial, constitué de l'AMS et du cortex moteur cingulaire, jouerait un rôle de «gatekeeper.» Lors de l'observation, ces deux structures bloqueraient les sorties motrices en empêchant l'activité prémotrice d'accéder au cortex moteur primaire. De plus, il est à relever que l'AMS reçoit des entrées du cortex moteur latéral, région reconnue pour être impliquée dans les actions extérosuscitées (i.e., actions guidées par des signaux sensoriels) (Tanjin & Shima, 1994). Or, lorsque le sujet est blessé, il est dans l'impossibilité d'exécuter des actions sollicitant la partie corporelle atteinte. Deuxièmement, la réduction du signal BOLD au sein de l'AMS peut être imputée à la diminution de l'activité de l'aire somatosensorielle (BA2), l'AMS recevant des entrées des aires somatosensorielles post-rolandiques (Luppino et al., 1993). La présente étude ne permet pas de privilégier l'une ou l'autre des deux explications. Des analyses complémentaires de connectivité pourraient apporter des éléments de réponses.

STS et Gyrus Fusiforme

Il a été montré que la blessure au membre inférieur impactait le niveau d'activation du STS et du gyrus fusiforme. Une augmentation de la réponse BOLD était révélée lorsque les sujets observaient un mouvement qu'ils ne pouvaient

présentement exécuter. Il peut être suggéré qu'un mécanisme visuel était mis en jeu afin de compenser la diminution de la réponse BOLD au niveau des zones miroires motrices (i.e., AMS et le cortex moteur cingulaire) et somatosensorielle (i.e., gyrus postcentral BA2). Cette interprétation peut être mise en rapport avec les propos de Buccino et al. (2004). Ils affirment que les actions n'appartenant pas au répertoire moteur du sujet observateur sont traitées par ce dernier visuellement et que celui-ci ne réalise pas de simulation motrice.

Une seconde interprétation, issue de la théorie du codage prédictif selon une perspective bayésienne (Kilner et al., 2007), peut être avancée. Dans ce cadre, des modèles génératifs sont utilisés pour prédire les conséquences sensorielles de ses propres actions mais également pour deviner, anticiper les actions d'autrui. L'inversion de ces modèles permet d'induire quelle commande motrice a été à l'origine d'une action en se basant sur les inputs visuels. Ces modèles génératifs sont directement applicables pour expliquer l'implication du SNM dans la compréhension d'actions et d'intentions (Kilner et al, 2007a, 2007b). Plus particulièrement, la cause la plus probable d'une action observée (i.e., le but de cette action) peut être inférée par la minimisation de l'estimation du signal d'erreur au sein de la hiérarchie des niveaux corticaux impliqués pendant le processus d'observation. Si les conséquences visuelles prédites, transmises par le modèle génératif aux plus bas niveaux de la hiérarchie corticale, diffèrent des inputs visuels, un signal d'erreur est émis ce qui signifie que les réponses visuelles ne sont pas inhibées (Hietanen & Perret, 1993, 1996). Il peut être avancé que les activations élevées relevées au sein du STS et du gyrus fusiforme traduisent le niveau d'estimation de l'erreur. Cette suggestion corrobore les travaux de Grèzes et al. (2004) qui ont décelé des niveaux d'activation très élevés au sein de ces régions lors de l'observation d'actions imprévisibles.

CONCLUSION

Ce projet a mis en évidence que le SNM classiquement reconnu par la littérature (i.e., cortices prémoteur et parietal) était mis en jeu chez des athlètes blessés au membre inférieur qui observaient des gestes sportifs sollicitant cette partie du corps. Ces régions étaient activées avec la même intensité lorsque ces sportifs visionnaient des gestes n'impliquant pas la partie corporelle blessée. En d'autres termes, la blessure n'a pas eu d'impact sur l'activation de ces zones corticales. Par contre, il a été révélé que certaines régions étaient affectées par l'incapacité temporaire du sportif d'effectuer certains gestes. Des régions récemment identifiées comme possédant des propriétés miroires (i.e., AMS, gyrus postcentral BA2, cortex moteur cingulaire) ont vu leur activité décroître alors que l'activité au sein de certaines régions visuelles (i.e., STS et gyrus fusiforme) a augmenté de manière significative.

A l'issue de ce rapport, que pouvons-nous suggérer aux acteurs du milieu sportif? Premièrement, il est reconnu que des déficits au niveau des sensations périphériques affectent profondément les performances lors de tâches de reconnaissance (e.g., Bosbach et al., 2005; Pavlova et al., 2003; Pazzaglia et al., 2008; Serino et al., 2010), mais également l'aptitude à prédire/anticiper les actions d'autrui (e.g., Banissy, 2010; Straube, 2010). S'entraîner à réaliser des tâches de reconnaissance (i.e., reconnaître un stimulus présenté antérieurement parmi un panel de stimuli) pourrait être préconisé (voir Figure 3). S'exercer à des tâches d'anticipation, via la technique d'occlusion spatiale ou temporelle, pourrait être un moyen d'enrayer les effets du manque de feedback (voir Figure 3). Deuxièmement, il a été relevé que le manque de feedback associé à la pratique physique influait sur le

degré d'activation au sein de la zone somatosensorielle. Une désactivation de cette région a été décelée (Calmels et al., en révision). Des sessions d'imagerie mentale (i.e., visuelle et kinesthésique), des sessions d'observation avec la consigne d'associer le «ressenti» pourraient être mises en place régulièrement et insérées harmonieusement dans le planning d'entraînement (voir Figure 3).

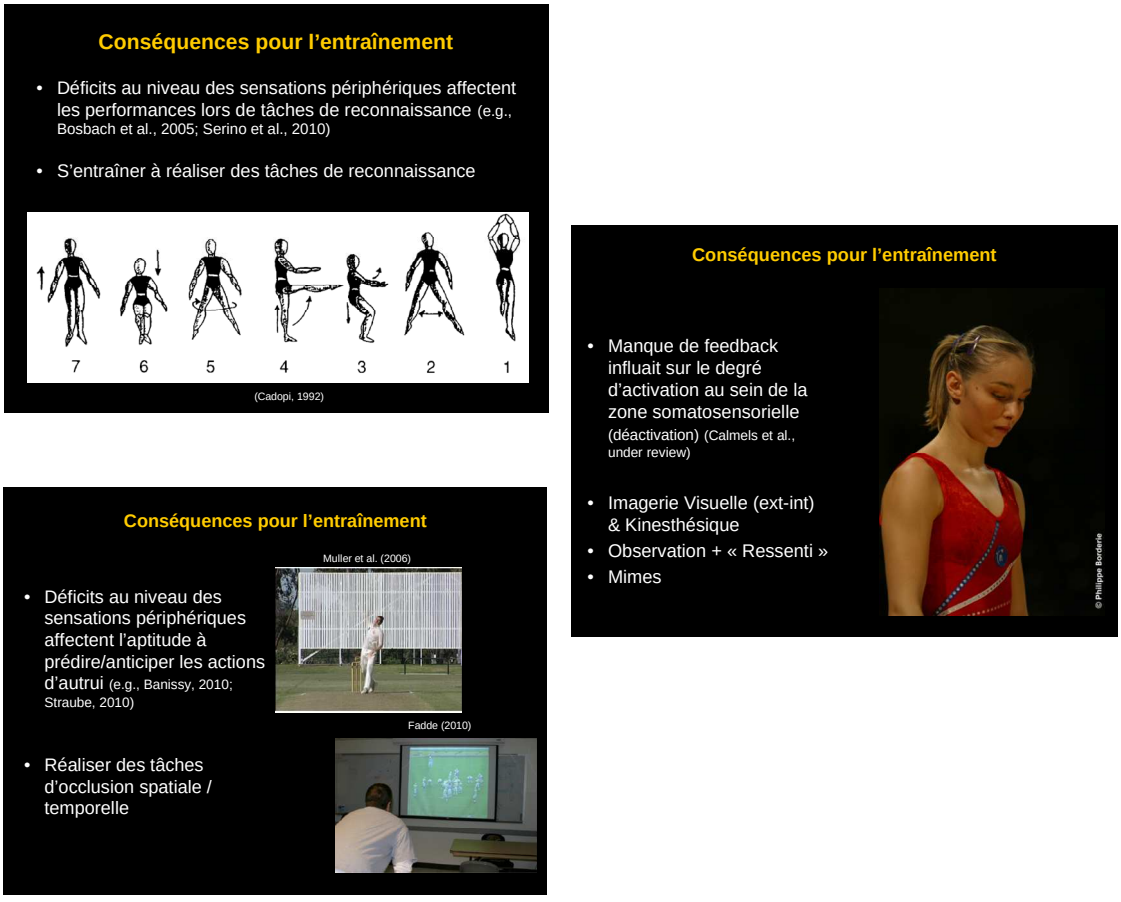


Figure 3. Conséquences pour l'entraînement (tiré présentation Calmels, juin 2011, Entretiens INSEP Prévention et Gestion de la Blessure)

Pour conclure, le lecteur devra être vigilant sur le fait que ces quelques suggestions ne sont en aucun des «recettes magiques» qui permettront d'apporter une ou des solution(s) aux éventuels problèmes rencontrés par un athlète privé momentanément d'informations kinesthésiques et proprioceptives. L'objectif de ce travail est avant tout de susciter un questionnement des acteurs du milieu sportif afin que ceux-ci engagent une réflexion sur leur pratique dans le but de l'optimiser.

REFERENCES

Banissy, M.J., Sauter, D.A., Ward, J., Warren, J.E., Walsh, V.,& Scott, S.K. (2010) Suppressing sensorimotor activity modulates the discrimination of auditory emotion but not speaker identity. *J. Neurosci.*, **30**, 13552-13557.

Beudel, M., Zijlstra, S., Mulder, Th., Zijdewind, I., & de Jong, B.M. (2011) Secondary sensory area SII is crucially involved in the preparation of familiar movements compared to movements never made before. *Hum. Brain Mapp.*, **32**, 564-579.

Bosbach, S., Cole, J., Prinz, W., & Knoblich, G. (2005) Inferring another's expectation from action: the role of peripheral sensation. *Nat. Neurosci.*, **8**, 1295-1297.

Buccino, G., Binkofski, F., Fink, G.R., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., Seitz, R.J., Zilles, K., Rizzolatti, G., & Freund, H.J. (2001) Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *Eur. J. Neurosci.*, **13**, 400-404.

Buccino, G., Vogt, S., Ritzl, A., Fink, G.R., Zilles, K., Freund, H.J., & Rizzolatti, G. (2004) Neural circuits underlying imitation learning of hand actions: an event-related fMRI study. *Neuron,* **42**, 323-334.

Calvo-Merino, B., Glaser, D.E., Grèzes, J., Passingham, R.E., & Haggard, P. (2005) Action observation and acquired motor skills: an fMRI study with expert dancers. *Cereb. Cortex*, **15**, 1243-1249.

Calvo-Merino, B., Grèzes, J., Glaser, D.E., Passingham, R.E., & Haggard, P. (2006) Seeing or doing? Influence of visual and motor familiarity in action observation. *Curr. Biol.*, **16**, 1905-1910.

Casile, A., & Giese, M.A. (2006) Non-visual motor learning influences the recognition of biological motion. *Curr. Biol.*, **16**, 69-74.

Cattaneo, L., Barchiesi, G., Tabarelli, D., Arfeller, C., Sato, M., & Glenberg, A.M. (ahead of print) One's motor performance predictability modulates the understanding of others' actions through adaptation of premotor visuo-motor neurons. *SCAN*.

Cochin, S., Barthelemy, C., Roux, S., Martineau, J. (1999) Observation and execution of movement: similarities demonstrated by quantified electroencephalography. *Eur. J. Neurosci.*, **11**, 1839-1842.

Cross, E.S., Hamilton, A.F.C., Grafton, S.T. (2006) Building a motor simulation de novo: observation of dance by dancers. *Neuroimage,* **31**, 1257-1267.

De Jong, B.M., Leenders, K.L., & Paans, A.M.J. (2002) Right parieto-premotor activation related to limb-independent antiphase movement. *Cereb. Cortex,* **12**, 1213-1217.

Dinstein, I., Hasson, U., Rubin, N., & Heeger, D.J. (2007) Brain areas selective for both observed and executed movements. *J. Neurophysiol.,* **98**, 1415-1427.

Dinstein, I., Gardner, J.L., Jazayeri, M., & Heeger, D.J. (2008) Executed and observed movements have different distributed representations in human aIPS. *J. Neurosci.,* **28**, 11231-11231.

Fadiga, L., Fogassi, L., Pavesi, G., & Rizzolatti, G. (1995) Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study. *J. Neurophysiol.,* **73**, 2608-2611.

Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L., & Rizzolatti, G. (1996) Action recognition in the premotor cortex. *Brain,* **119**, 593-609.

Gangitano, M., Mottaghy, F.M., & Pascual-Leone, A. (2001) Phase-specific modulation of cortical motor output during movement observation. *Neuroreport,* **12**, 1489-1492.

Gazzola, V., & Keysers, C. (2009) The observation and execution of actions share motor and somatosensory voxels in all tested subjects: single-subject analyses of unsmoothed fMRI data. *Cereb. Cortex,* **19**, 1239-1255.

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

Grèzes, J., Armony, J.L., Rowe, J., & Passingham, R.E. (2003) Activations related to "mirror" and "canonical"neurones in human brain: an fMRI study. *Neuroimage,* **18**, 928-937.

Grèzes, J., Frith, C.D., & Passingham, R.E. (2004) Inferring false beliefs from the actions of oneself and others: an fMRI study. *Neuroimage,* **21**, 744-750.

Heberlein, A.S., Adolphs, R., Tranel, D., & Damasio, H. (2004) Cortical regions for judgments of emotions and personality traits from pointlight walkers. *J. Cognitive Neurosci.,* **16**, 1143-1158.

Hietanen, J.K., & Perrett, D.I. (1993) Motion sensitive cells in the macaque superior temporal sensory area. I. Lack of response to the sight of the animal's own limb movement. *Exp. Brain Res.,* **93**, 117-128.

Hietanen, J.K., & Perrett, D.I. (1996) A comparison of visual responses to object- and ego-motion in the macaque superior temporal polysensory area. *Exp. Brain Res.,* **108**, 341-345.

Hommel, B. (2004) Event files: feature binding in and across perception and action. *Trends Cogn. Sci.*, **8**, 494-500.

Iacoboni, M., Wood, R.P., Brass, M., Bekkering, H., Mazziotta, J.C., & Rizzolatti, G. (1999) Cortical mechanisms of human imitation. *Science*, **286**, 2526-2528.

Iacoboni, M., Molnar-Szakacs, I., Gallese, V., Buccino, G., Mazziotta, J.C., & Rizzolatti, G. (2005) Grasping the intentions of others with one's own mirror neuron system. *PLoS Biol.*, **3**, e79.

Jackson, P.L., Meltzoff, A.N., & Decety, J. (2005) How do we perceived the pain of others? A window into the neural processes involved in empathy. *Neuroimage*, **24**, 771-779.

Jeannerod, M. (1994) The representing brain: neural correlates of motor intention and imagery. *Behav. Brain Sci.,* **17**, 187-245.

Keysers, C., Kaas, J.H., & Gazzola, V. (2010) Somatosensation in social perception. *Nat. Rev. Neurosci.,* **11**, 417-428.

Keysers, C., Wicker, B., Gazzola, V., Anton, J.L., Fogassi, L., & Gallese, V. (2004) A touching sight: SII/PV activation during the observation and experience of touch. *Neuron,* **42**, 335-346.

Kilner, J.M., Friston, K.J., & Frith, C.D., (2007) Predictice coding: an account of the mirror neuron system. *Cogn. Process*, **8**, 159-166.

Luppino, G., Matelli, M., Carmada, R., & Rizzolatti, G. (1993) Corticocortical connections of area F3 (SMA-Proper) and area F6 (Pre-SMA) in the macaque mokey. *J. Comp. Neurol.,* **338,** 114-140.

Miall, R.C., & Wolpert, D.M. (1996). Forward models for physiological motor control. Neural Networks, 9, 1265-1279.

Naito, E., Roland, P.E., Grefkes, C., Choi, H.J., Eickhoff, S., Geyer, S., Zilles, K., & Ehrsson, H.H. (2005) Dominance of the right hemisphere and role of area 2 in human kinaesthesia. *J. Neurophysiol.,* **93**, 1020-1034.

Nishitani, N., & Hari, R. (2000) Temporal dynamics of cortical representation for action. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **97**, 913-918.

Passingham, R.E. (1996). Attention to action. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol.,* **351**, 1473-1480.

Pavlova, M., Staudt, M., Sokolov, A., Birbaumer, N., & Krageloh-Mann, I. (2003) Perception and production of biological movement in patients with early periventricular brain lesions. *Brain,* **126**, 692-701.

Pazzaglia, M., Smania, N., Corato, E., & Aglioti, S.M. (2008) Neural underpinnings of gesture discrimination in patients with limb apraxia. *J. Neurosci.,* **28**, 3030-3041.

Pelphrey, K.A., Singerman, J.D., Allison, T., & McCarthy, G. (2003) Brain activation evoked by perception of gaze shifts: the influence of context. *Neuropsychologia,* **41**, 156-170.

Pitcher, D., Garrido, L., Walsh, V., & Duchaine, B.C. (2008) Transcranial magnetic stimulation disrupts the perception and embodiment of facial expressions. *J. Neurosci.,* **28**, 8929-8933.

Pons, T.P., & Kass, J.H. (1986) Corticocortical connections of area 2 of somatosensory cortex in macaque monkeys: a correlative anatomical and electrophysiological study. *J. Comp. Neurol.,* **248**, 313-335.

Pourtois, G., Sanders, D., Andres, M., Grandjean, D., Reveret, L., Olivier, E., & Vuilleumier, P. (2004) Dissociable roles of the human somatosensory and superior temporal cortices for processing social face signals. *Eur. J. Neurosci.,* **20**, 3507-3515.

Prinz, W. (1997) Perception and action planning. *Eur. J. Cogn. Psychol.,* **9**, 129-154.

Reid, V.M., Belsky, J., & Johnson, M.H. (2005) Infant perception of human action: toward a developmental cognitive neuroscience of individual differences. *Cognition, Brain, Behavior,* **IX**, 193-210.

Ricciardi, E., Bonino, D., Sani, L., Vecchi, T., Guazzelli, M., Haxby, J.V., Fadiga, L., & Pietrini, P. (2009) Do we really need vision? How blind people "see" the actions of others. *J. Neurosci.,* **29**, 9719-9724.

Rizzolatti, G., Fogassi, L., & Gallese, V. (2001) Neurophysiological mechanisms underying the understanding and imitation of action. *Nat. Rev. Neurosci.,* **2**, 661-670.

Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004) The mirror neuron system. *Annu. Rev. Neurosci.,* **27**, 169-192.

Rozzi, S. Calzavara, R., Belmalih, A., Borra, E., Gregorio, G.G., Matelli, M., & Luppino, G. (2006) Cortical connections of the inferior parietal cortical convexity of the macaque monkey. *Cereb. Cortex,* **16**, 1389-1417.

Rozzi, S., Ferrari, P.F., Bonini, L., Rizzolatti, G., & Fogassi, L. (2008) Functional organization of inferior parietal lobule convexity in the macaque monkey: electrophysiological characterization of motor, sensory and mirror responses and their correlation with cytoarchitectonic areas. *Eur. J; Neurosci.*, **28**, 1569-1588.

Serino, A., De Filippo, L., Casavecchia, C., Coccia, M., Shiffrar, M., & Ladavas, E. (2010) Lesions to the motor system affect action perception. *J. Cognitive Neurosci.,* **22**, 413-426.

Schippers, M.B., & Keysers, C. (2011) Mapping the flow of information within the putative mirror neuron system during gesture observation. *Neuroimage*. Doi: 10.1016/j.neuroimage.2011.02.018.

Singer, T., Seymour, B., O'Doherty, J., Kaube, H., Dolan, R.J., & Frith, C.D. (2004) Empathy for pain involves the affective but not sensory components of pain. *Science,* **303**, 1157-1162.

Stevens, J.A., Fonlupt, P. Shiffrar, M., & Decety, J. (2000) New aspects of motion perception: selective neural encoding of apparent human movements. *Neuroreport,* **11**, 109-115.

Strafella, A.P., & Paus, T. (2000) Modulation of cortical excitability during action observation: a transcranial magnetic stimulation study. *Neuroreport,* **11**, 2289-2292.

Turella, L., Erb, M., Grood, W., & Castiello, U. (2009) Visual features of an observed agent do not modulate human brain activity during action observation. *Neuroimage,* **46**, 844-853.

Urgesi, C., Candidi, M., Fabbro, F., Romani, M. & Aglioti, S. (2006) Motor facilitation during action observation: topographic mapping of the target muscle and influence of the onlooker's posture. *Eur. J. Neurosci.,***23**, 2522-2530.

Vonesh, E.F. & Chinchilli, V.G. (1997) *Crossover Experiments. Linear and Nonlinear Models for the Analysis of Repeated Measurements*. Chapman and Hall, London.

Wicker, B., Keysers, C., Plailly, J., Royet, J.P., Gallses, V., & Rizzolatti, G. (2003) Both of us disguted in my insula: the common neural basis of seeing and feeling disgust. *Neuron,* **40**, 655-664.

Wilson, M., & Knoblich, G. (2005) The case of motor involvement in perceiving conspecifics. *Psychol. Bull.,* **131**, 460-473.

Wolpert, D.M., & Flanagan, J.R. (2001) Motor prediction. *Curr. Biol.*, **11**, R729-R732.

ANNEXE 1

Mouvements aux barres asymétriques et au sol et durée de ces mouvements

Mouvements aux Barres Asymétriques	Mouvements réalisés par	Durées des mouvements
Série de bascules	Gymnaste 1	7240 ms
Bascule Equilibre (placement dos)	Gymnaste 1	3680 ms
Passement Filé (dégagement à l'oblique haute)	Gymnaste 1	5080 ms
Soleils aux barres asymétriques	Gymnaste 1	4320 ms
Soleils aux sangles	Gymnaste 1	3560 ms
Lunes aux sangles	Gymnaste 1	4320 ms
Série de bascules	Gymnaste 2	6320 ms
Bascule Equilibre (placement dos)	Gymnaste 2	3520 ms
Passement Filé (dégagement à l'oblique haute)	Gymnaste 2	4400 ms
Soleils aux barres asymétriques	Gymnaste 2	4400 ms
Soleils aux sangles	Gymnaste 2	3960 ms
Lunes aux sangles	Gymnaste 2	4080 ms
Série de bascules	Gymnaste 3	7080 ms
Bascule Equilibre (placement dos)	Gymnaste 3	4120 ms
Passement Filé (dégagement à l'oblique haute)	Gymnaste 3	5040 ms
Soleils aux barres asymétriques	Gymnaste 3	4400 ms
Soleils aux sangles	Gymnaste 3	3960 ms
Lunes aux sangles	Gymnaste 3	4600 ms

Mouvements au Sol	Mouvements réalisés par	Durées des mouvements
Salto avant tendu	Gymnaste 1	3040 ms
Salto arrière tendu	Gymnaste 1	4280 ms
Salto avant groupé	Gymnaste 1	4120 ms
Salto arrière groupé	Gymnaste 1	4920 ms
Vrille avant	Gymnaste 1	4320 ms
Vrille arrière	Gymnaste 1	5160 ms
Salto avant tendu	Gymnaste 2	4480 ms
Salto arrière tendu	Gymnaste 2	4520 ms
Salto avant groupé	Gymnaste 2	4040 ms
Salto arrière groupé	Gymnaste 2	4120 ms
Vrille avant	Gymnaste 2	3680 ms
Vrille arrière	Gymnaste 2	4440 ms
Salto avant tendu	Gymnaste 3	5040 ms
Salto arrière tendu	Gymnaste 3	4720 ms
Salto avant groupé	Gymnaste 3	4440 ms
Salto arrière groupé	Gymnaste 3	4920 ms
Vrille avant	Gymnaste 3	4040 ms
Vrille arrière	Gymnaste 3	5640 ms

Mouvements Présentés lors des Stimuli Oddballs	Mouvements réalisés par	Durées des mouvements
1 ½ vrille arrière	Gymnaste 1	4240 ms
1 ½ vrille avant	Gymnaste 1	3440 ms
2 vrille arrière	Gymnaste 1	5160 ms

Double salto arrière groupé	Gymnaste 1	4640 ms
Passement filé à l’équilibre	Gymnaste 1	5400 ms
1 ½ vrille arrière	Gymnaste 2	4640 ms
1 ½ vrille avant	Gymnaste 2	4600 ms
2 vrille arrière	Gymnaste 2	4440 ms
Double salto avant groupé	Gymnaste 2	3800 ms
Passement filé à l’équilibre	Gymnaste 2	5640 ms
1 ½ vrille avant	Gymnaste 3	3640 ms
2 vrille arrière	Gymnaste 3	3920 ms

ANNEXE 2

Questions posées lors de l'étude pilote

Nom :
Prénom :
Date de naissance :
Nombre d'années de pratique dans la gymnastique :

Après avoir regardé sur l'écran le mouvement de gymnastique, donne-moi ton avis sur ce mouvement en te positionnant sur les échelles ci-dessous.

1) Ce mouvement fait-il intervenir les bras

0	10
Non	Oui

2) Ce mouvement fait-il intervenir les jambes

0	10
Non	Oui

3) Je trouve que ce mouvement est

0	10
Facile	Difficile

4) Je trouve que ce mouvement est

0	10
pas risqué	risqué

5) Pour réaliser ce mouvement correctement, je dois faire

0	10
Pas d'effort	Des efforts

6) Je suis habituée à voir ce mouvement

0	10
Non	Oui

7) Je suis habituée à réaliser physiquement ce mouvement

0	10
Non	Oui

8) Si tu es blessée à la main, au poignet, à l'avant bras, ou au bras, peux-tu faire ce geste

0	10
Non	Oui

9) Si tu es blessée au pied, à la cheville, à la jambe ou à la cuisse, peux-tu faire ce geste

0	10
Non	Oui

ANNEXE 3
Communication réalisée lors du 17ème Congrès International de Human Brain Mapping (26-30 juin 2011, Quebec City Canada)

Can we Simulate an Action that we Cannot Temporarily Perform?

Claire Calmels[1], Swann Pichon[2], & Julie Grèzes[3,4]
[1]Institut National du Sport de l'Expertise et de la Performance, Paris, France
[2]Laboratory for Behavioral Neurology and Imaging of Cognition, Department of Neuroscience, Medical School, University of Geneva, Switzerland
[3]LNC-INSERM U960 – DEC – Ecole Normale Supérieure, Paris, France [4]Centre de NeuroImagerie de Recherche (CENIR), Paris, France
Corresponding author: claire.calmels@insep.fr

Background and Objective

Evidence for the existence of a specialized system in humans (Mirror Neuron System, hMNS) for perceiving actions have been provided (Buccino et al., 2001; Dinstein et al., 2007; Gazzola & Keysers, 2009). This hMNS displays certain properties. It depends upon the biomechanical properties of the observed actions (Stevens et al., 2000) and importantly here on the observer's personal motor repertoire (Calvo-Merino et al., 2005, 2006). Moreover, lack of peripheral sensations (Bosbach et al., 2005) and lesions to the motor system (Serino et al., 2010) highly impinged the recognition of other's actions. These difficulties in action perception were suggested to be due to the inability to map the observed action onto a (motor) representation or to the lack of afferent somatosensory feedback.

☞ **The aim of this study was to examine whether a temporary motor inability to perform a specific action would also affect action perception and associated neural bases.**

Methods

❑ SUBJECTS

- 13 national female gymnasts who suffered from a lower extremity injury at the onset of the experiment.
  - able to perform the bars routines,
  - unable to perform the floor routines.

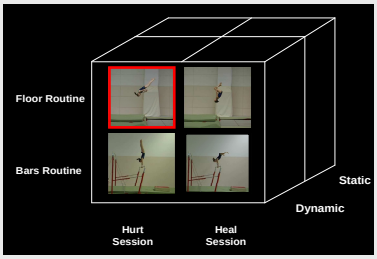
❑ STIMULI

- 6 bars and 6 floor routines executed by 3 national gymnasts (Dyn Bars & Dyn Floor) + 36 static postures edited from the bars and floors videos (Stat Bars & Stat Floor).

❑ EXPERIMENTAL PROCEDURE

- **2 IRM sessions per subjects within a 6 months period.**
  - Hurt session (able to practice bars & unable to practice floor),
  - Heal session (able to practice bars & able to practice floor),

  Task: Observe the stimuli carefully and press each time a red target point appeared at the centre of the video frame. (124 stimuli: 18 dynamic bars routines, 18 dynamic floor routines, 18 static bars routines, 18 static floor routines, 16 oddballs, 36 null events)



- **fMRI Acquisition**: 3T Trio TIM (Siemens), TR = 2080ms.

- **Statistical Analyses (SPM2):**
  - For whole brain analysis, random effect model: A 2 x 2 x 2 [session (Hurt, Heal), characteristic (Dyn, Stat), routine (Bars, Floor)] repeated-measures ANOVA,
  - Conjunction analysis between the main effects of Dynamic vs. Static bars and floor routines: [(Bars Dyn vs. Bars Stat) Heal] ∩ [(Floor Dyn vs. Floor Stat) Heal] ∩ [(Bars Dyn vs. Bars Stat) Hurt] ∩ [(Floor Dyn vs. Floor Stat) Hurt] ,
  - ROI analysis on the brain areas of the Mirror Neuron System.
  - On the parameter estimates of the maxima of each ROI: 2 x 2 [session (Hurt, Heal), routine (Bars Dyn, Floor Dyn)] repeated-measures ANOVA or Friedman ANOVAs + Wilcoxon's test with Bonferroni correction.

References

Bosbach, S., Cole, J., Prinz, W., & Knoblich, G. (2005) *Nat. Neurosci.*, **8**, 1295-1297.
Buccino, G., Binkofski, F., Fink, G.R., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., Seitz, R.J., Zilles, K., Rizzolatti, G., & Freund, H.J. (2001) *Eur. J. Neurosci.*, **13**, 400-404.
Buccino, G., Vogt, S., Ritzl, A., Fink, G.R., Zilles, K., Freund, H.J., & Rizzolatti, G. (2004) *Neuron*, **42**, 323-334.
Calvo-Merino, B., Glaser, D.E., Grèzes, J., Passingham, R.E., & Haggard, P. (2005) *Cereb. Cortex*, **15**, 1243-1249.
Calvo-Merino, B., Grèzes, J., Glaser, D.E., Passingham, R.E., & Haggard, P. (2006) *Curr. Biol.*, **16**, 1905-1910.
Dinstein, I., Hasson, U., Rubin, N., & Heeger, D.J. (2007) *J. Neurophysiol.*, **98**, 1415-1427.
Gazzola, V., & Keysers, C. (2009) *Cereb. Cortex*, **19**, 1239-1255.
Kilner, J.M., Friston, K.J., & Frith, C.D. (2007) *Cogn. Process*, **8**,159-166.
Serino, A., De Filippo, L., Casavecchia, C., Coccia, M., Shiffrar, M., & Ladavas, E. (2010) *J. Cognitive Neurosci.*, **22**, 413-426.
Stevens, J.A., Fonlupt, P. Shiffrar, M., & Decety, J. (2000) *Neuroreport*, **11**, 109-115.

Results

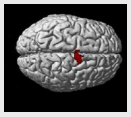
❑ **Brain regions of the hMNS engaged during the perception of Dynamic vs. Static actions (left Figure). Part of this network shows an interaction between Session and Routine (see Table).**

Common activations during the observation of bars and floor routines irrespective of the subjects' state of health, revealed by a conjunction analysis between [(Bars Dyn vs Bars Stat) Heal] ∩ [(Floor Dyn vs. Floor Stat) Heal] ∩ [(Bars Dyn vs. Bars Stat) Hurt] ∩ [(Floor Dyn vs Floor Stat) Hurt]. Only activations within ROIs (i.e., regions belonging to the hMNS or involved in the biological motion processing) are listed. The *p* values for the Session x Routine Interaction within each ROI are provided. NS stands for Non Significant.

Anatomical Regions	MNI x	y	z	T Score	Z score	Cluster Size	p Values
Right SMA (BA6)	8	-4	74	4.12	3.92	233	.031
Left SMA (BA6)	-2	-4	72	3.47	3.35	233	.0036
Right Postcentral Gyrus (BA2)	28	-40	50	3.69	3.54	194	.025
Left Motor Cingulate Cortex	-12	-22	42	5.82	5.32	124	.032
Right STS	54	-46	10	5.56	5.11	3654	.048
Left STS	-56	-56	12	5.95	5.42	2665	.025
Right Fusiform Gyrus	42	-50	-18	3.29	3.18	67	.0073
Left Fusiform Gyrus	-44	-66	-16	3.36	3.06	2665	.0035

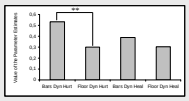
p<.005 uncorrected, k > 10 voxels. All peaks survived false discovery rate (FDR) correction (p<0.05).

❑ **Decrease of activity in somatomotor areas with temporary injury. (SMA, Somatosensory area BA2, & Motor Cingulate area).**



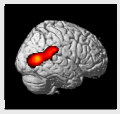
Right SMA

(xyz = 8 -4 74)



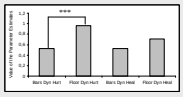
** $p < .015$

❑ **Increase of activity in visual areas (STS and Fusiform) with temporary injury.**



Right STS

(xyz = 54 -46 10)



*** $p < .003$

Discussion

Decrease of activity in somatomotor areas with temporary injury.

- The reduction of activity in somatosensory area BA2 associated with normal level of activity within the classical hMNs (parietal and premotor cortex) suggests that during the Hurt period, the motor representation of a perceived action is triggered in the absence of the vivid experience of "what it feels like" associated with its performance.
- During action observation, SMA and Motor Cingulate Cortex are suggested to play the role of a gatekeeper by preventing the development of overt actions during action observation (Gazzola & Keysers, 2009). A reduction in SMA and Motor Cingulate Cortex's activity may be due to the weakening of their connections with lateral Premotor Cortex or Somatosensory area BA2 or both.

Increase of activity in visual areas with temporary injury.

- Either a visual mechanism to compensate for the decrease in somatomotor areas (consistent with Buccino et al., 2004).
- Or reflect the level of prediction error (stemming from the predictive coding framework, Kilner et al., 2007).

Acknowledgment : This work was supported by a grant from the French Ministry of Health and Sport.

RESUME

L’objet de cette étude était d’améliorer la compréhension des processus mobilisés par l’être humain lors de l’observation de comportements réalisés par ses congénères et d’examiner si l’incapacité temporaire d’un agent observateur de réaliser certaines actions permettait l’accès aux représentations motrices de ces actions. Plus spécifiquement, il s’est agi d’investiguer si le système des neurones miroirs (SNM) chez le sportif blessé était activé. Treize gymnastes féminines expertes, blessées au membre inférieur au début de l’expérimentation, ont été scannées à deux reprises. Le premier examen IRM a eu lieu lorsqu’elles étaient blessées, le second lorsqu’elles étaient rétablies c’est-à-dire six mois plus tard. Lors du premier examen par IRM, les gymnastes ont été scannées alors qu’elles observaient des mouvements qu’elles étaient en mesure de réaliser (i.e., mouvements aux barres asymétriques) et des mouvements qu’elles étaient incapables temporairement d’exécuter (i.e., mouvements au sol). Lors du second examen par IRM, une procédure similaire a été mise en place mais, cette fois-ci, les sujets étaient aptes à effectuer tous les mouvements visionnés. Une séquence en écho-planar (EPI) pondérée en T2 a été utilisée. Les résultats ont montré que le SNM classiquement cité dans la littérature (i.e., cortices prémoteur latéral et pariétal) était activé que les gymnastes soient capables ou non de réaliser les mouvements observés. Par contre, lors du visionnage de mouvements temporairement irréalisables par ces sportives, une diminution d’activation au sein de l’AMS, du cortex moteur cingulaire, et du gyrus postcentral (BA2) (régions récemment reconnues comme appartenant au réseau des NM) et une augmentation d’activation au sein des aires visuelles (i.e., STS et gyrus fusiforme) ont été révélées. Ces résultats ont été discutés en relation avec les travaux récents réalisés dans le domaine des neurosciences cognitives et computationnelles. Des conséquences pour l’entraînement sportif ont été évoquées.

Mots Clefs : Observation, Système des Neurones Miroirs, Blessure, Gymnastique, IRMf