

BF
20.5
UL
2002
J13

PHILIP L. JACKSON

L'EFFET DE LA PRATIQUE DE MOUVEMENTS PAR IMAGERIE MOTRICE
SUR L'APPRENTISSAGE D'HABILITÉS ET
L'ORGANISATION CÉRÉBRALE FONCTIONNELLE

Thèse
présentée
à la Faculté des études supérieures
de l'Université Laval
pour l'obtention
du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)

ÉCOLE DE PSYCHOLOGIE
FACULTÉ DES SCIENCES SOCIALES
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

Octobre 2002

© Philip L. Jackson, 2002



RÉSUMÉ DE LA THÈSE

L'objectif de cette thèse était d'examiner les processus comportementaux et cérébro-fonctionnels associés à la pratique mentale (PM) d'habiletés motrices, afin d'en favoriser l'intégration en réadaptation neurologique. Une première étude a d'abord validé la tâche de séquence du pied (TSP) qui permet de mesurer l'apprentissage d'une habileté motrice du membre inférieur auprès de populations d'âges différents et de patients atteints de lésions cérébrales. Une deuxième étude a démontré que la PM par imagerie motrice, combinée à la pratique physique, améliorerait davantage l'apprentissage de la TSP que la pratique physique seule. De plus, il a été démontré qu'une autre forme de PM, la répétition verbale, améliorerait aussi l'apprentissage à la TSP. Cependant, seuls les sujets qui avaient utilisé l'imagerie motrice ont retenu la séquence à long terme, suggérant que ce processus contribue non seulement à l'apprentissage mais aussi à la rétention des acquis. Une étude de cas a ensuite mesuré l'effet de la combinaison de la pratique physique et de la PM sur l'apprentissage de la TSP chez un patient ayant eu un accident vasculaire cérébral. Les résultats confirment que la PM peut bonifier l'apprentissage lorsqu'elle est combinée à la pratique physique et qu'elle s'avère utile pour favoriser la rétention de nouvelles habiletés lorsqu'elle est utilisée seule. Finalement, une étude de tomographie par émission de positrons a montré qu'après un entraînement par PM et imagerie motrice les sujets ont amélioré leur performance à la TSP, et ont également présenté des changements d'activité cérébrale similaires à ceux observés après la pratique physique. Toutefois, il semble que l'imagerie motrice utilisée seule induit une amélioration de la performance en agissant sur les systèmes liés à la préparation et l'anticipation motrice plutôt qu'à l'exécution en soi. Dans l'ensemble, les travaux effectués dans le cadre de cette thèse confirment que la PM avec imagerie motrice est une méthode d'entraînement qui peut améliorer de manière significative l'apprentissage d'habiletés motrices et qui influence l'organisation cérébrale fonctionnelle. Ces résultats ont un impact sur la recherche et l'utilisation future de la PM en réadaptation physique.

Philip Jackson
Étudiant au doctorat

Julien Doyon, Ph.D.
Directeur

Francine Malouin, Ph.D., pht
Co-directrice

THESIS ABSTRACT

The main objective of this thesis was to examine the behavioural and functional cerebral reorganization produced by the mental practice of a motor skill in order to promote the use of this training method in neurologic rehabilitation. A first study was conducted to validate a new foot sequence task (FST) that allows precise measurement of the learning of sequential foot movements in normal subjects and patients with motor impairments. The results of a second study, which aimed at determining if motor imagery is essential to the learning of the FST through mental practice, showed that mental practice with motor imagery improved the learning of this task more than physical practice alone. Moreover, it was found that another type of mental practice, verbal rehearsal, can also improve the learning of the FST. However, only the subjects that had used motor imagery during practice remembered the sequence after several months without practice, which suggests that motor imagery contributes to learning but more importantly, that it is essential for the long term retention of motor skills learned with mental practice. A single-case study was then conducted to examine the effect of combined physical and mental practice on the learning of the FST in a patient who had had a stroke 4 months earlier. The results confirm that MP with motor imagery can improve the learning of this task when combined with physical practice and can contribute to the retention of the skill when used alone. Finally, a study using positron emission tomography showed that subjects who practiced the FST with motor imagery improved their performance, and displayed a functional reorganization similar to that observed after physical practice. However, practice with motor imagery seems to produce changes on the systems subserving motor preparation and anticipation rather than execution per se. Overall, the findings of this thesis confirm that MP with motor imagery is efficient at improving motor skill learning, and that this form of training changes the cerebral organization of subjects. The various results also provided new guidelines for future research and the use of mental practice in a neurologic rehabilitation.

Philip Jackson
Candidate

Julien Doyon, Ph.D.
Supervisor

Francine Malouin, Ph.D., pht
Co-supervisor

AVANT-PROPOS

Mes tous premiers remerciements vont à mon directeur de recherche, Julien Doyon, qui depuis des années m'ouvre les portes du monde académique. Sa générosité, son appui et la confiance qu'il m'a témoigné ont été exemplaires tout au long de mes études graduées.

Merci à ma co-directrice, Francine Malouin, qui a aussi été un guide précieux et qui m'a introduit à la réadaptation et à la recherche clinique. Je garde d'excellents souvenirs de nos "brain storming" lors de l'élaboration de différents projets qui étaient toujours animés de son étonnante curiosité scientifique.

Je tiens également à remercier Carol Richards, membre de mon comité de thèse et directrice du Centre Interdisciplinaire de Recherche en Réadaptation et Intégration Sociale qui m'a fourni son support inconditionnel tout au long de mes études doctorales, et que j'admire tant pour ses capacités de leader que pour sa rigueur scientifique.

La contribution de Janel Gauthier et de Gabriel Leonard, également membres de mon comité de thèse, m'a permis non seulement de rester sur le droit chemin tout au long de mes études mais également d'ouvrir mes réflexions vers d'autres domaines.

Un gros merci à tous mes collègues de différentes disciplines que j'ai eu la chance de fréquenter à travers les années. Je pense particulièrement à mes collègues du laboratoire de Julien Doyon (Marie-Christine, Martin, Miriam, Bobby, Hélène, et Alain), aux étudiants du baccalauréat qui ont expérimenté pendant de nombreuses heures, et aussi à des gens qui ont travaillé dans le Groupe de Recherche en Réadaptation Physique (particulièrement Luc Hébert, Lise Dion et Cathy Dean) qui m'ont offert de nombreuses idées.

L'assistance de Kate Hanratty et d'Isabelle Deaudelin en ce qui a trait aux analyses statistiques et à la présentation des données m'a été des plus bénéfiques. Elles se sont montrées toujours disponibles et pleines de ressources, et je les remercie chaleureusement.

Merci également à Murielle Côté dont la disponibilité et l'efficacité étonne toujours et qui m'a "sorti du trouble" à maintes reprises.

Je ne peux faire autrement que d'accorder un remerciement spécial à mon collègue et ami, Martin Lafleur, qui m'a accompagné dès le début dans cette aventure, depuis la construction de la tâche de séquence du pied dans son sous-sol, jusqu'au partage de la joie de savoir nos articles publiés. Son organisation, sa persévérance et surtout son amitié ont grandement contribué au succès de ce projet.

Je remercie aussi ma "gang" d'amis qui, même s'ils se plaisent à me demander si je fais toujours courir des rats dans des labyrinthes, me permettent de garder le moral et de m'évader dans un imaginaire tout autre que celui de la pratique mentale.

Merci à mes parents, qui sont à l'origine de ma curiosité et de mon ouverture d'esprit, et qui me supportent de leur amour dans tout ce que j'entreprends.

Je garde mes remerciements les plus tendres pour Marie-Christine, ma collègue, ma coloc, mon amie, ma complice, qui, plus que tout autre, a partagé les joies et les frustrations attachées à l'élaboration de cette thèse de doctorat, et qui a accepté de se joindre à moi pour le reste de l'aventure.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ DE LA THÈSE EN FRANÇAIS.....	i
RÉSUMÉ DE LA THÈSE EN ANGLAIS.....	ii
AVANT-PROPOS.....	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	v
LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES.....	vii
CHAPITRE 1: INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
OBJECTIFS DE LA THÈSE.....	16
CHAPITRE 2: ARTICLE 1: Potential Role of Mental Practice using Motor Imagery in Neurologic Rehabilitation.....	18
CHAPITRE 3: ARTICLE 2: Validation of a Sequential Learning Task for the Lower Limb.....	52
CHAPITRE 4: ARTICLE 3: Learning and Retention of a Foot-Sequence Task Using different types of Mental Practice: the Importance of Motor Imagery.....	75
CHAPITRE 5: ARTICLE 4: The Efficacy of Combined Physical and Mental Practice in the Learning of a Foot-Sequence Task after Stroke: a Case Study.....	109
CHAPITRE 6: ARTICLE 5: Cerebral Reorganization Associated with Motor Sequence Learning using Motor Imagery Practice.....	135
CHAPITRE 7: DISCUSSION GÉNÉRALE.....	163
CONCLUSION.....	178
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	180
ANNEXE 1: LA TÂCHE DE SÉQUENCES DU PIED (la TSP).....	204

ANNEXE 2: QUESTIONNAIRE D'IMAGERIE VISUELLE ET KINÉSTHÉSIQUE ET ÉTUDE PRÉLIMINAIRE DE SES PROPRIÉTÉS PSYCHOMÉTRIQUES.....	205
ANNEXE 3: CHEDOKEE-MCMASTER STROKE ASSESSMENT: LEG & FOOT.....	223
ANNEXE 4: CONSIGNES D'IMAGERIE MOTRICE.....	224
ANNEXE 5: ÉTUDE PRÉLIMINAIRE À L'ÉTUDE DE TOMOGRAPHIE PAR EMISSION DE POSITRONS.....	225

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

ARTICLE 1: POTENTIAL ROLE OF MENTAL PRACTICE USING MOTOR IMAGERY IN NEUROLOGIC REHABILITATION.

Tableau 1.	Brain mapping studies of healthy subjects executing and imagining upper limb movements.....	50
Figure 1.	Model representing the various processes involved in three different types of practice.....	51

ARTICLE 2: VALIDATION OF A NEW SEQUENTIAL LEARNING TASK FOR THE LOWER LIMB.

Figure 1.	Mean response time in milliseconds (ms) for the Young Control (YC) and the Older Control (OC) groups across the 10 training sessions. Error bars show standard error.....	70
Figure 2.	Comparison of the mean response time in milliseconds (ms) for the Practiced (PS) and Non-Practiced (N-PS) sequence in Sessions 1, 5 and 10. Response times for the Young and Older groups were merged. Error bars show standard error.....	71
Figure 3.	Comparison of the mean response time in milliseconds (ms) for the first three sessions of the Practiced (corresponding to Sessions 1, 2, 3) and the Non-Practiced sequence (Sessions 1, 5, 10). Response times for the Young and Older groups were merged. Error bars show standard error.....	72
Figure 4.	Average response time of the four patients with a hemiparesis and the Older Control group (OC) across the 10 learning sessions.....	73
Figure 5.	Standard deviations of the four patients with a hemiparesis for each of the 10 training sessions.....	74

ARTICLE 3: LEARNING AND RETENETION OF A FOOT-SEQUENCE TASK
WITH MENTAL PRACTICE: THE IMPORTANCE OF MOTOR IMAGERY.

- Figure 1. The experimental design comprised seven experimental sessions. Session 1 consisted of the pre-training baseline, Sessions 2 to 6 corresponded to weekly evaluations, and Session 7 was conducted to assess the retention of the skill. Between Sessions 1 to 6, subjects in the MI and VR groups practiced mentally a 6-element sequence of foot movements or foot positions.....102
- Figure 2. Percentage improvement of the Motor Imagery group, in the Practiced Sequence and Random conditions, at the beginning of practice (Early Learning), at the end of practice (Late Learning) and after an interval of several months (Retention), as compared to the Baseline performance. Error bars show the standard error.....103
- Figure 3. Percentage improvement of the Verbal Rehearsal group, in the Practiced Sequence and Random conditions, at the beginning of practice (Early Learning), at the end of practice (Late Learning), and after an interval of several months (Retention), as compared to the Baseline performance. Error bars show the standard error..... 104
- Figure 4. Percentage improvement of No-Practice Control group, in the Practiced Sequence and Random conditions, at the beginning of practice (Early Learning), at the end of practice (Late Learning), and after an interval of several months (Retention), as compared to the Baseline performance. Error bars show the standard error..... 105
- Figure 5. Percentage improvement in the Imagined Practiced Sequence condition, for the Motor Imagery and Control groups, at the beginning of practice (Early Learning), at the end of practice (Late Learning), and after an interval of several month (Retention), as compared to the Baseline performance. Error bars show the standard error..... 106

- Figure 6. Individual data on three subjects in the Motor Imagery group showing how each subject consistently either underestimates (A), overestimates (C) or correctly estimates the time taken (in sec) to perform the task (Executed), when asked to imagine it (Imagined)..107
- Figure 7. The Action-Language-Imagination Model (Annett, 1995; Hall, Moore, Annett, Rogers, 1997) displaying the relationship between Movement and speech (black box = Action-Language Bridge)..... 108

ARTICLE 4: THE EFFICACY OF COMBINED PHYSICAL AND MENTAL PRACTICE IN THE LEARNING OF A FOOT SEQUENCE TASK AFTER STROKE: A CASE STUDY.

- Table 1. Clinical Data for the Patient.....132
- Table 2. Motor Imagery Practice Instructions.....133

- Figure 1. a) Graph illustrating the patient's average response time in milliseconds for each session, and during the three different training periods (Physical Practice Only, Combined Physical and Mental Practice, Mental Practice Only).
- b) Graph illustrating the patient's average standard deviation taken from the blocks for each session, and during the three different training periods (Physical Practice Only, Combined Physical and Mental Practice, Mental Practice Only).
- c) Graph illustrating the patient's average number of errors for each session, and during the three different training periods (Physical Practice Only, Combined Physical and Mental Practice, Mental Practice Only)..... 134

ARTICLE 5: CEREBRAL REORGANIZATION ASSOCIATED WITH MOTOR SEQUENCE LEARNING USING MOTOR IMAGERY PRACTICE .

- Figure 1. a) Mean response time in milliseconds (ms) to execute the Random (R)

and the Sequence (S) conditions before (Early Learning) and after (Late Learning) intensive motor imagery practice. b) Mean time in seconds (sec.) to complete one block of 4 sequences using motor imagery, before (Early Learning) and after (Late Learning) intensive motor imagery practice..... 159

Figure 2. Merged PET-MRI sections illustrating the dynamic rCBF changes associated with mental practice of the Foot-Sequence Task averaged over the 9 subjects for the following subtractions: a) Sequence Execution-Late Learning minus Sequence Execution-Early Learning, b) Sequence Imagination-Late Learning minus Sequence Imagination-Early Learning, c) Sequence Execution-Late Learning minus Random Execution-Late Learning, d) Sequence Execution-Late learning minus Sequence Execution-Early Learning correlated with the percentage improvement, e) Sequence Execution-Early Learning minus Sequence Execution-Late Learning, f) Sequence Imagination -Early Learning minus Sequence Imagination-Late Learning.....160

Figure 3. a) Merged PET-MRI sections illustrating the dynamic rCBF changes associated with mental practice of the Foot-Sequence Task for both the Executed (green) and Imagined (red) conditions in a) the medial orbitofrontal region (subtraction: Late Learning minus Early Learning), and in b) the cerebellum (subtraction: Early Learning minus Late Learning). The images were averaged over the 9 subjects..... 161

Table 1. Comparison of the Late Learning conditions minus the Early Learning conditions. Activation foci representing peaks of statistically significant increases in normalized CBF. The stereotaxic coordinates are expressed in mm. 162

Table 2. Comparison of the Early Learning conditions minus the Late Learning conditions. Activation foci representing peaks of statistically significant increases in normalized CBF. The stereotaxic coordinates are expressed in mm. 162

Québec, le 6 mai 2002

OBJET : Thèse de doctorat présentée à la faculté des Études Supérieures de l'Université Laval par Philip Jackson intitulée : L'effet de la pratique de mouvements par imagerie motrice sur l'apprentissage d'habiletés et l'organisation cérébrale fonctionnelle.

Madame,
Monsieur,

Par la présente, les soussignés co-auteurs d'un article intitulé Potential Role of Mental Practice using Motor Imagery in Neurologic Rehabilitation, faisant partie de la thèse présentée à la faculté des Études Supérieures de l'Université Laval par Philip Jackson donnent leur autorisation pour l'insertion d'articles dans la thèse et l'éventuel microfilmage de cette thèse selon les règles de la Bibliothèque nationale du Canada.

En espérant le tout conforme, veuillez, Madame, Monsieur, accepter mes plus cordiales salutations.

Philip Jackson, M.Ps.

Carol Richards, pht, Ph.D.

Martin Lafleur, Ph.D.

Francine Malouin, pht, Ph.D.

Julien Doyon, Ph.D.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Parmi les facultés intellectuelles de l'être humain, l'imagination se présente à la fois comme l'une des plus fascinantes et l'une des plus difficiles à cerner empiriquement. L'imagination est la « faculté de se représenter par l'esprit des objets ou des faits irréels, ou jamais perçus, de restituer à la mémoire des perceptions ou des expériences antérieures » (Petit Larousse Illustré, Édition 2000). En philosophie, on distingue généralement l'imagination *créatrice*, qui invente de nouvelles images ou de nouvelles combinaisons d'images, de l'imagination *reproductrice*, qui fait revivre le passé. La créativité est donc l'une des conséquences heureuses de notre imagination par laquelle on produit de nouvelles combinaisons à partir de sensations déjà connues. Cette forme d'imagination a cependant souvent été opposée à la raison en philosophie parce qu'elle apparaît comme étant imprévisible. Il est cependant possible d'utiliser notre imagination rationnellement et de manière contrôlée. À propos de cette distinction, Kant écrit:

« En tant que l'imagination est spontanéité, je l'appelle aussi quelquefois l'imagination productrice et je la distingue par là de l'imagination reproductrice, dont la synthèse est uniquement soumise à des lois empiriques, à celles de l'association, et qui, par conséquent, ne contribue en rien par là à l'explication de la possibilité de la connaissance a priori et, pour cette raison, n'appartient pas à la philosophie transcendantale, mais à la psychologie » (source Médina, Morali, & Sénik, 1986).

C'est donc cette dernière définition de l'imagination qui nous intéresse plus particulièrement, et nous laisserons le soin aux philosophes de débattre sur la nature de l'autre processus.

Ainsi, il est possible, grâce à notre imagination, de revivre des événements passés à volonté. Habituellement perçue comme un « regard intérieur », cette forme dite

reproductrice de l'imagination ne se limite cependant pas à la seule modalité visuelle, malgré le biais étymologique introduit par le terme « image ». En effet, il nous est possible d'évoquer mentalement non seulement des images, mais aussi des sons, des goûts, des odeurs, des mouvements, des émotions, ou encore de multiples combinaisons de ces sensations, et tout cela, en l'absence de stimuli externes. Pour ne pas nous laisser confondre avec les multiples définitions proposées pour ce type d'imagination, nous utiliserons le terme « imagerie mentale » qui représente le processus cognitif *actif* et *conscient* par lequel on ré-évoque des perceptions et sensations passées, et qui relève du domaine de la mémoire et de l'apprentissage. Plus spécifiquement, la présente thèse s'intéresse à l'imagerie motrice qui consiste en l'imagerie mentale de mouvements du corps humain sans que des mouvements ne soient exécutés. L'imagerie motrice est en quelque sorte une évocation des mouvements du corps dans la mémoire de travail (Decety & Grezes, 1999) aussi connue comme la mémoire à court terme.

L'utilisation de l'imagerie motrice à répétition, pendant plusieurs séances, dans le but d'apprendre ou de parfaire une habileté, réfère à la pratique mentale. La pratique mentale est une technique d'entraînement souvent employée dans le sport. Les athlètes l'utilisent pour s'imaginer des routines de gymnastique, des plongeurs ou encore des lancers au panier afin de préparer l'exécution ultime de ces actions. Jack Nicklaus, par exemple, prétend que chacun de ses coups de golf sont préalablement visualisés et mentalement pratiqués (McLean & Richardson, 1994). La pratique mentale de mouvements, aussi appelée « visualisation », est donc très répandue dans le monde des athlètes et de nombreux chercheurs s'y sont intéressés (par exemple, Green, 1994; Hall, Rodgers, & Blair, 1990; Murphy, 1994).

Notons que le terme « visualisation », tout comme le terme « imagination », souffre du biais visuel souvent attaché à ce processus, alors qu'il est connu que les athlètes, lorsqu'ils s'entraînent mentalement, ne tentent pas seulement de voir mais essaient aussi de ressentir les sensations provoquées par le ou les mouvements pratiqués (Jeannerod,

1995), et font donc appel à l'imagerie motrice. À titre de clarification, il est important de faire la distinction entre le processus cognitif qu'est l'imagerie motrice et la technique d'entraînement que représente la pratique mentale, qui peut utiliser ou non l'imagerie motrice (Ravey, 1998).

La pratique mentale a généré des résultats si prometteurs dans le monde des athlètes et en psychologie sportive que la suggestion de transposer cette méthode à d'autres contextes n'a su tarder. Même avant la publication de méta-analyses faisant état du potentiel de la pratique mentale, plusieurs chercheurs ont proposé, au cours des quarante dernières années, d'utiliser ce moyen pour bonifier la réadaptation physique de personnes ayant subi un dommage neurologique affectant leur motricité (Decety, 1993; Richardson 1964; Van Leeuwen & Inglis, 1998; Warner & McNeill, 1988; Yue & Cole, 1992). Malgré les nombreuses tentatives de relancer cette idée innovatrice et l'invitation à la soumettre à des essais cliniques, très peu de recherches ont visé l'efficacité de la pratique mentale en réadaptation. Pourtant, les études systématiques et contrôlées de l'effet bénéfique de la pratique mentale effectuées à ce jour permettent de croire qu'il n'est pas un épiphénomène. De nombreux facteurs ont été évoqués pour expliquer ce manque d'expérimentations rigoureuses en réadaptation, dont la difficulté de contrôler les paramètres de l'imagination, l'absence d'un modèle unifié servant à expliquer par quel processus la pratique mentale peut améliorer la performance d'habiletés motrices, et le manque de compréhension des mécanismes neuronaux associés à l'apprentissage par cette forme d'entraînement.

La présente thèse de doctorat se veut donc un effort pour pousser la compréhension des facteurs comportementaux et des processus neuronaux impliqués dans la pratique mentale et plus spécifiquement dans la pratique mentale par imagerie motrice. Le but n'est donc pas spécifiquement de tester à grande échelle la pratique mentale avec des patients qui ont des troubles de nature neurologique, mais surtout d'analyser systématiquement cette méthode d'entraînement à la lumière des nouvelles connaissances et nouvelles

technologies en neurosciences. L'objectif ultime d'une telle entreprise est donc de guider la recherche et l'utilisation future de la pratique mentale en réadaptation neurologique.

La Pratique Mentale : Apprentissage et Réorganisation Cérébrale

Une compréhension approfondie de la pratique mentale et de ses effets se doit d'étudier ce phénomène sur plusieurs plans à la fois. Afin de mieux cerner les questions qui touchent à l'utilisation de cette forme d'entraînement avec des patients ayant des atteintes neurologiques, il apparaît essentiel d'examiner, d'une part, les aspects comportementaux associés à l'apprentissage par pratique mentale, et d'autre part, les connaissances qui touchent à l'influence que peut avoir la pratique mentale sur l'organisation fonctionnelle du cerveau.

Volet comportemental

Une expérience type visant à tester l'efficacité de la pratique mentale consiste en l'assignation aléatoire de sujets à l'un de trois ou quatre groupes. Un premier groupe doit s'entraîner physiquement à une habileté (par exemple des lancers de dards), pendant qu'un autre groupe pratique la même tâche mentalement pour un nombre équivalent d'essais, et qu'un troisième groupe n'est soumis à aucune forme d'entraînement et sert de groupe contrôle. Un quatrième groupe est parfois ajouté, à qui l'on demande de s'entraîner selon une combinaison préétablie de pratique physique et de pratique mentale. De façon générale, les résultats de nombreuses études démontrent que les sujets qui combinent l'entraînement physique et la pratique mentale s'améliorent le plus, suivis des sujets qui pratiquent physiquement, ensuite des sujets qui pratiquent mentalement. Finalement, les sujets du groupe contrôle ne s'améliorent habituellement pas (voir Corbin, 1972; Driskell, Copper, & Moran, 1994; Feltz & Landers, 1983; Hinshaw, 1991; Richardson, 1967a; 1967b pour des relevés de cette littérature et des méta-analyses

témoignant de l'effet de la pratique mentale). Ainsi, la plupart des auteurs dans le domaine s'accordent à dire que cette forme d'entraînement est supérieure à aucune pratique du tout. S'il est évident que cette technique ne suffit pas à remplacer la pratique physique, elle s'avère néanmoins un bon complément au sein d'un programme d'entraînement.

Malgré ces résultats positifs, de nombreux facteurs ont été identifiés comme pouvant influencer l'effet de la pratique mentale (voir Budney, Murphy, & Woolfolk, 1994; Hall, Buckolz, & Fishburne, 1992; Hall, Schmidt, Durand, & Buckolz, 1994, pour des discussions concernant ces facteurs), ajoutant ainsi à la controverse entourant cette méthode d'entraînement. La plupart de ceux-ci se divisent en deux catégories, soit les facteurs reliés au processus d'imagerie comme tel, et ceux qui ont trait à la tâche ou à l'habileté pratiquée.

La nature du processus d'imagerie.

Puisque l'imagerie est un processus cognitif essentiellement interne, qui ne peut être observé ni vérifié directement, les instructions fournies aux sujets ont une incidence cruciale sur la manière dont ils conçoivent mentalement une habileté. Nous verrons au chapitre 2 que des chercheurs ont utilisé différents moyens ingénieux pour obtenir des corrélats indirects, soit chronométriques ou physiologiques, du processus d'imagerie. Puisqu'il n'existe toujours pas de moyen *direct* de vérifier ce que les sujets font exactement pendant l'imagerie, il est important de donner des instructions claires, précises et standardisées. Sans de tels contrôles, un nombre élevé de facteurs peuvent varier d'un sujet à l'autre, et peuvent ainsi influencer les résultats de la pratique. Afin de standardiser ces instructions, certains chercheurs utilisent des enregistrements audio qu'ils font écouter aux sujets avant ou pendant la pratique mentale (par exemple, Page, Levine, Sisto, & Johnston, 2001). Quoique cela permette d'uniformiser les instructions pour tous les sujets d'une même expérience, une sur-utilisation de guides externes peut aussi avoir comme conséquence de rendre les sujets plus passifs dans leur entraînement, et ainsi nuire

au contrôle des images évoquées pendant la pratique mentale (Hinshaw, 1991). Cette baisse d'implication du sujet n'est évidemment pas souhaitable, particulièrement en réadaptation où la motivation joue souvent un rôle clé (Van Leeuwen & Inglis, 1998). L'utilisation d'enregistrements avant la pratique mentale, et non pendant, est peut-être suffisante pour uniformiser les instructions sans pour autant contraindre le processus d'imagerie.

La perspective d'imagerie utilisée pendant la pratique mentale est un bon exemple d'un facteur susceptible d'être influencé par des instructions précises. Ainsi, imaginer selon une perspective à la première personne (perspective interne) implique que la personne imagine voir et ressentir les mouvements comme si elle les exécutait elle-même. Par contre, l'utilisation d'une perspective à la troisième personne (perspective externe) implique que la personne se voit ou voit quelqu'un d'autre, devant elle, en train d'exécuter les mouvements. Alors que la perspective à la troisième personne incite les sujets à se concentrer surtout sur les aspects visuels des mouvements, la perspective à la première personne favorise une intégration des aspects visuels ainsi que des composantes kinesthésiques reliées aux mouvements pratiqués (Hall et al., 1994). Certains auteurs ont suggéré que l'interaction entre l'aspect visuel et la composante kinesthésique serait possiblement essentielle à l'efficacité de la pratique mentale. Richardson (1967a) suggère que la pratique mentale est la répétition symbolique d'une activité physique en l'absence de mouvements significatifs (i.e., "the symbolic rehearsal of a physical activity in the absence of any gross muscular movement"), une définition qui véhicule la complexité de ce processus et qui va au-delà d'une simple composante visuelle. Quoique les travaux ayant tenté de comparer directement les deux types de perspective d'imagerie aient donné des résultats mitigés (Hall et al., 1994), la tendance des athlètes à utiliser spontanément la perspective à la première personne suggère que cette méthode est plus efficace. Toutefois, cela n'implique pas que l'imagerie à la troisième personne n'ait pas son utilité dans l'apprentissage d'habiletés. D'autres arguments en faveur de l'imagerie motrice à la première personne découlent du modèle présenté dans l'article du chapitre 2 et les lecteurs y sont référés pour approfondir cette discussion.

Un autre aspect du processus d'imagerie susceptible d'influencer l'effet de la pratique mentale est la qualité de l'image produite par les sujets. Ainsi, les résultats de certaines études suggèrent que, plus les images produites sont claires et vivaces, meilleures seront les conséquences de la pratique mentale (par exemple, Marks, 1977). Cependant, plusieurs chercheurs mettent en doute l'existence d'une relation entre la qualité des images produites et l'aboutissement d'un entraînement par pratique mentale (Annett, 1995; Dean & Morris, 1991; Richardson, 1988). Ce doute s'appuie sur l'idée présentée auparavant que les aspects visuels ne sont pas aussi importants que d'autres, notamment les aspects kinesthésiques, dans l'imagination et la pratique mentale de mouvements. D'autres chercheurs ont proposé que le degré de contrôle du sujet sur son processus d'imagerie corrélait avec les effets de la pratique mentale sur la performance (Hall, Buckolz, & Fishburne, 1989). Ce contrôle pourrait donc s'avérer un meilleur moyen de prédire l'amélioration de la performance.

Évaluation subjective de l'imagerie.

Dans le but d'objectiver les compétences d'imagerie des sujets, plusieurs questionnaires ont été développés au cours des dernières décennies. Ces questionnaires prennent généralement tous la même forme. Ils consistent en une série de scénarios ou de mouvements que les sujets doivent d'abord exécuter, puis s'imaginer. On leur demande alors d'allouer une note sur une échelle de type Likert qualifiant l'image, le mouvement ou encore la sensation qu'ils ont réussi à évoquer (par exemple, Betts, 1909; Hall & Pongrac, 1983; Isaac, Marks, & Russell, 1986; Sheehan, 1967). Les scores représentent donc une évaluation subjective que les sujets attribuent à leur capacité d'imagerie. Dans le cadre de la présente thèse, nous estimions important d'obtenir de telles données afin de déterminer la pertinence de tels outils dans un cadre de réadaptation physique. Cependant, les questionnaires d'imagerie que l'on retrouve dans la littérature ont souvent été élaborés dans un cadre de performance sportive et certains des mouvements requis ne sont pas compatibles avec les capacités d'une population neurologique présentant des troubles

locomoteurs (par exemple, effectuer une roulade au sol). De plus, tous ces questionnaires sont rédigés en anglais. Ainsi, dans la phase initiale de cette thèse, un questionnaire en français basé sur le *Movement Imagery Questionnaire* de Hall et Pongrac (1983) a été développé et adapté pour une population ayant des troubles neurologiques affectant la motricité. Parmi les principales modifications, les mouvements qui requièrent beaucoup d'agilité, comme par exemple faire un roulade au sol, ont été retirés. De plus, l'échelle de cotation a été réduite à cinq points (Isaac et al., 1986), plutôt que sept (Hall & Pongrac, 1983). Ce questionnaire, le Questionnaire d'Imagerie Kinesthésique et Visuelle (QIKV), ainsi qu'une première étude de validation de celui-ci, sont présentés à l'Annexe 2.

Le choix d'une tâche motrice.

La variété de tâches ayant fait l'objet de recherches sur la pratique mentale, allant des lancers de ballons au panier, au traçage de labyrinthes avec les doigts, en passant par une épreuve d'équilibre chez les gens âgés, atteste de la difficulté à généraliser les résultats d'une étude à l'autre. Néanmoins, des méta-analyses qui ont examiné l'interaction entre la nature des tâches utilisées et l'importance de l'effet de la pratique mentale nous renseignent sur certains aspects qui semblent influencer le potentiel de ce mode d'entraînement. Le facteur qui semble influencer le plus la grandeur de l'effet dans les méta-analyses (Driskell et al., 1994; Feltz & Landers, 1983) est la « teneur » en processus cognitifs requis par une tâche ou une habileté. Ainsi, des tâches impliquant uniquement de la force musculaire, de l'endurance ou de la coordination profiteraient moins de la pratique mentale que celles requérant des opérations cognitives comme l'organisation de stimuli, la prise de décisions ou la résolution de problèmes (Driskell et al., 1994). Dans son relevé, Corbin (1972) décrivait plutôt un avantage pour les tâches demandant des habiletés perceptuelles et symboliques sur celles impliquant uniquement des habiletés motrices.

Si la dichotomie entre les aspects moteurs et les aspects cognitifs d'une habileté semble intuitive lorsque l'on compare deux tâches très différentes, leur distinction au sein d'une

même habileté n'est pas toujours possible (voir le modèle au chapitre 2 qui propose une alternative à cette dichotomie). Il existe néanmoins un protocole expérimental dans la littérature sur l'apprentissage d'habiletés motrices qui semble offrir la possibilité de manipuler et de mesurer séparément ces deux modes de traitement. En effet, les différents paradigmes expérimentaux basés sur la *Serial Reaction Time Task* (Nissen & Bullemer, 1987) peuvent dissocier la connaissance d'une séquence donnée (aspect cognitif) de l'apprentissage de l'habileté à exécuter cette séquence rapidement et sans erreur (aspect moteur).

Afin d'étudier les effets de la pratique mentale sur la performance, nous avons donc conçu une nouvelle tâche d'apprentissage basée sur le paradigme de la *Serial Reaction Time Task* qui permet une mesure fiable et précise des temps de réponse requis pour produire une série de mouvements du pied: la tâche de séquence du pied (TSP). Nous nous sommes particulièrement intéressés à la fonction du membre inférieur, essentielle à la locomotion, laquelle est souvent diminuée suite à une lésion cérébrale consécutive à un accident vasculaire cérébral. L'indépendance fonctionnelle étant fortement liée à la fonction locomotrice, il va sans dire que sa récupération constitue un objectif d'une grande importance chez la plupart des patients.

Une première version de cette tâche requérait de pointer le pied vers des cibles lumineuses, ce qui exigeait d'effectuer des mouvements séquentiels de tout le membre inférieur. Toutefois, à la suite de quelques études exploratoires effectuées avec cette première version de la tâche, il fut décidé de construire un second prototype (Annexe 1). Cette décision fut poussée par l'intention d'uniformiser le plus possible le protocole expérimental qui serait utilisé lors d'études comportementales d'une part, et lors d'études par imagerie cérébrale d'autre part. De plus, cette nouvelle tâche qui implique des mouvements de la cheville (flexion dorsale ou flexion plantaire) en réponse à des stimuli auditif, devait pouvoir être effectuée à la fois par des sujets sains et par des personnes ayant un déficit moteur à la suite d'un trouble neurologique. Ainsi, en réduisant la

difficulté des mouvements à un seul segment (la cheville) comparativement à des mouvements de la jambe entière comme dans le premier prototype, nous réduisons le nombre de variables pouvant expliquer un changement de performance. Nous augmentons aussi l'étendue des patients pouvant utiliser l'appareil. De plus, cette version de la tâche devrait être plus simple à s'imaginer, un atout intéressant puisque certaines études ont montré qu'une tâche simple était plus facile à imaginer et à mémoriser qu'une tâche plus complexe (Hall, 1980; Hall & Buckholz, 1981). Dans la nouvelle version de la TSP, les mouvements du reste du corps sont donc par le fait même réduits à un minimum, ce qui s'avère aussi un avantage précieux lors d'études d'imagerie cérébrale. En effet, afin d'obtenir des images fiables du cerveau et de son fonctionnement, ce type d'étude requiert une immobilité du tronc et de la tête. Les études présentées dans cette thèse ont donc toutes été effectuées à l'aide de cette seconde version de la tâche de séquence du pied décrite en détails au chapitre 3.

L'expertise des sujets.

La pratique mentale est-elle plus utile pour des novices ou pour des experts? Cette question est complexe et a fait l'objet de plusieurs recherches qui ont mené à des résultats supportant deux hypothèses (Hall et al., 1994). La première hypothèse veut que la pratique mentale soit plus utile au début de l'apprentissage d'une habileté parce que les phases initiales d'acquisition comportent plus de composantes cognitives. Cette hypothèse rejoint la théorie exposée plus tôt voulant que la pratique mentale soit plus efficace avec des tâches de nature plus cognitives. La deuxième hypothèse postule que la pratique mentale est plus efficace chez des « experts » puisque les personnes qui ont plus d'expérience ont une meilleure représentation interne des mouvements, et peuvent donc mieux se les imaginer et en bénéficier davantage (Hall et al., 1994). Pour réconcilier ces deux hypothèses, il est possible que la pratique mentale soit bénéfique à différents niveaux d'expertise en agissant sur des processus propres à chaque stade d'apprentissage. Néanmoins, il est raisonnable de croire qu'un minimum de connaissance d'une tâche est requis pour pouvoir l'imaginer, puisque, après tout, l'imagerie motrice nécessite une ré-

évoquant, dans la mémoire de travail, de mouvements connus. Bandura (1997) a écrit : “There is little value to cognitive enactment (mental practice) in the early phase of learning before an adequate conception of the skilled activity has been formed” p.376. Ce qui constitue une “conception adéquate” de l’habileté reste cependant à être mieux défini.

Volet réorganisation cérébrale : Effets de la pratique mentale sur la plasticité cérébrale

Une question qui demeure sans réponse et qui s’avère importante dans un contexte de réadaptation physique est de savoir si la pratique mentale influence l’organisation cérébrale fonctionnelle des sujets. Ainsi, le manque de compréhension des processus neuronaux impliqués dans cette méthode d’entraînement continue d’alimenter le scepticisme de certains chercheurs. Dans un contexte de réadaptation neurologique, les liens avec les systèmes neuronaux sous-jacents sont effectivement importants à établir afin de justifier l’utilisation de cette méthode et surtout d’en promouvoir une utilisation éclairée. Une meilleure compréhension des systèmes impliqués dans la pratique mentale aiderait par exemple à cibler les patients les plus susceptibles de profiter d’une telle technique. Tout comme certains chercheurs l’ont souligné (par exemple, Budney et al., 1994) une mauvaise utilisation de la pratique mentale peut être infructueuse, voire même néfaste à l’apprentissage des sujets, causant peut-être entrave aux autres formes d’entraînement utilisées.

Étonnamment, l’idée que la pratique mentale et l’imagerie peuvent modifier les circuits cérébraux a été suggérée il y a déjà plusieurs siècles par le philosophe Nicolas Malebranche (1638-1715). Il a écrit ceci sur l’imagination : « ...*la faculté d’imaginer, ou l’imagination, ne consiste que dans la puissance qu’a l’âme de se former des images des objets, en produisant des changements dans les fibres de cette partie du cerveau que l’on peut appeler partie principale, parce qu’elle répond à toutes les parties de notre corps, et que c’est le lieu où notre âme réside immédiatement, s’il est permis de parler ainsi* » (Médina, Morali, & Sénik, 1986). Sans vouloir nécessairement identifier où se trouve cette « partie principale » et l’âme qu’elle cache, nous avons néanmoins comme but

d'explorer l'interaction entre l'imagerie motrice et le fonctionnement du cerveau. Comme il est possible de le constater dans un relevé exhaustif de la littérature (voir chapitre 2) très peu d'études ont visé directement la réorganisation cérébrale que peut produire la pratique mentale. Ainsi, les hypothèses générées sur ce sujet dans cette thèse proviennent principalement 1) du constat que les mouvements imaginés et les mouvements exécutés partagent un même réseau de systèmes corticaux et sous-corticaux et, 2) des travaux sur la réorganisation cérébrale à la suite de la pratique physique d'une habileté.

Au cours des deux dernières décennies, un nombre grandissant de travaux se sont penchés sur l'effet que peut avoir la pratique physique d'une habileté motrice sur l'organisation cérébrale fonctionnelle ou la plasticité du cerveau. Ainsi, il a été démontré, grâce à des études chez l'animal, à des études avec des patients porteurs de lésions spécifiques au cerveau ou de maladies dégénératives (par exemple la maladie de Parkinson), et à des études d'imagerie cérébrale, que des systèmes neuronaux différents pouvaient être sollicités selon le degré d'apprentissage à une tâche donnée (voir Doyon & Ungerleider, 2002, pour un récent relevé de la littérature sur les études d'imagerie cérébrale fonctionnelle). Il existe au moins deux de ces systèmes impliquant des structures corticales et sous-corticales qui ont été identifiés à l'aide d'études anatomiques, soit les boucles cortico-striato-thalamo-corticale et cortico-cerebello-thalamo-corticale (Middleton & Strick, 1997; Picard & Strick, 1996; Tanji, 1996).

Plusieurs études d'imagerie cérébrale fonctionnelle ont confirmé l'existence de ces deux boucles et leur importance dans l'apprentissage d'habiletés motrices. De plus, il semble, à la lumière de certains résultats, que l'implication de ces deux systèmes neuronaux diffère selon l'expertise des sujets, ou encore leur stade d'apprentissage. De récentes études psychophysiologiques suggèrent que les habiletés motrices s'apprennent selon au moins deux phases distinctes. La première, pendant laquelle une grande quantité d'information est apprise en une seule session d'entraînement, est appelée « phase d'apprentissage rapide », et la seconde qui est caractérisée par des gains graduels lors des sessions

d'entraînement, voire des semaines subséquentes, se nomme « phase d'apprentissage lent » (fast and slow learning stages; voir Brashers-Krug, Shadmehr, & Bizzi, 1996; Karni et al., 1998; Nudo, Milliken, Jenkins, & Merzenich, 1996). Il existe possiblement une phase transitoire dite de consolidation, qui aurait lieu dans une fenêtre temporelle d'environ 6 heures suivant une période de pratique (Jackson et al., 1997; Karni & Sagi, 1993). Quoiqu'il en soit, après plusieurs sessions de pratique, une habileté résiste bien au passage du temps et demeure facilement accessible même après une longue période sans pratique additionnelle (Doyon & Ungerleider, 2002).

Si l'on adopte cette nomenclature et que l'on examine les recherches sur l'apprentissage d'habiletés et l'imagerie cérébrale, on trouve des données suggérant que le cervelet est plus sollicité en début d'apprentissage (phase d'apprentissage rapide; par exemple, Doyon et al., 1996; Jenkins et al., 1994) qu'il ne l'est lorsqu'une séquence est bien apprise (Friston et al., 1992; Grafton, Woods, & Mike, 1994; Jueptner et al., 1997; Seitz et al., 1994; Toni et al., 1998). Le striatum semble aussi, selon certaines études, être important en début d'apprentissage, lorsque la tâche implique des stratégies cognitives et sollicite beaucoup la mémoire de travail (Jenkins et al., 1994; Jueptner et al., 1997; Toni, Krams, Turner, & Passingham, 1998). Par contre, d'autres travaux ont montré que le striatum est plus activé lorsque la performance atteint un niveau asymptotique (Doyon et al., 1996; Grafton et al., 1994; Jueptner et al., 1997) et que cette activité est maintenue même après une période de pratique prolongée. Ces résultats suggèrent que le striatum ainsi que les structures motrices impliquées dans la boucle cortico-striato-thalamo-corticale (par exemple, l'aire motrice supplémentaire et le cortex moteur, voir Classen, Liepert, Wise, Hallett, & Cohen, 1998; Gordon, Lee, Flament, Ugurbil, & Ebner, 1998; Hund-Georgiadis, & von Cramon, 1999; Karni et al., 1995) sont essentielles au maintien à long terme d'une habileté bien apprise. Ces résultats supportent aussi le modèle voulant que la réorganisation cérébrale fonctionnelle associée à l'apprentissage d'une habileté s'observe au sein de différents systèmes et de différentes structures cérébrales (Doyon, 1997; Doyon & Ungerleider, 2002).

Il existe des résultats suggérant un autre mécanisme de réorganisation cérébrale associé à la pratique d'une habileté motrice. En effet, certaines études d'imagerie cérébrale chez l'humain (Grafton et al., 1992; Karni et al., 1996; 1998) et de stimulation intracrânienne chez le singe (Nudo et al., 1996; Nudo, Wise, SiFuentes, & Milliken, 1996) ont montré qu'après la pratique, des changements de la représentation cérébrale étaient observés à l'intérieur même des structures impliquées dans l'exécution d'une tâche. Ces résultats supportent l'hypothèse que ce sont les mêmes systèmes neuronaux qui sous-tendent l'exécution d'une tâche à différents niveaux d'apprentissage, mais que la représentation au sein de ces systèmes se modifie avec la pratique.

Contrairement aux efforts des dernières années visant à mieux comprendre la plasticité du cerveau associée à l'apprentissage physique d'une habileté, il existe très peu de travaux qui ont examiné la réorganisation cérébrale après la pratique mentale. En effet, la seule étude ayant utilisé une technique d'imagerie cérébrale est celle de Pascual-Leone et ses collaborateurs (1995) qui ont démontré, grâce à la stimulation magnétique intracrânienne, des changements de la représentation corticale associée à la pratique mentale de mouvements de pianotage (voir chapitre 2). Aucune étude n'a encore été menée sur la réorganisation dans l'ensemble du cerveau et des multiples systèmes qu'il comporte, à la suite de la pratique mentale. Une des missions de la présente thèse est donc de combler cette lacune dans les écrits sur la pratique mentale.

OBJECTIFS DE LA THÈSE

Cette thèse vise à intégrer les connaissances actuelles sur la pratique mentale et l'imagerie motrice, de même qu'à les interpréter dans un cadre de réadaptation. Elle cherche à répondre à des questions spécifiques concernant des facteurs comportementaux et cérébro-fonctionnels qui doivent être considérés avant de soumettre systématiquement des patients à cette forme de traitement avant-gardiste. L'intégration de ces champs d'étude, basée sur une conception contemporaine de la pratique mentale, permet d'émettre des hypothèses susceptibles de générer des résultats ayant un impact sur la recherche et l'utilisation future de la pratique mentale en réadaptation physique.

Les objectifs de la présente thèse sont :

- 1) D'élaborer un modèle de l'apprentissage d'habileté par pratique mentale en prenant en considération les plus récentes connaissances sur cette méthode d'entraînement et sur le processus sous-jacent qu'est l'imagerie motrice. Ce modèle fournira un cadre théorique pour les expériences effectuées dans cette thèse.
- 2) De développer et de valider une nouvelle tâche permettant de mesurer l'apprentissage d'une habileté motrice auprès de populations d'âges différents et auprès de patients atteints d'une lésion cérébrale. Cette tâche doit être relativement portative et compatible aux restrictions associées à des études de tomographie par émission de positrons.
- 3) De tester l'hypothèse voulant que l'imagerie motrice soit une composante essentielle à la pratique mentale d'une habileté motrice.
- 4) De tester l'efficacité de la pratique mentale par imagerie motrice chez un patient ayant eu un accident vasculaire cérébral produisant des déficits moteurs.
- 5) De tester l'hypothèse que la pratique mentale par imagerie motrice produit des changements de l'organisation cérébrale fonctionnelle semblables à ceux induits par la pratique physique.

Afin de remplir ses objectifs, la présente thèse, comporte plusieurs chapitres adressant chacun un aspect différent de la pratique mentale par imagerie motrice. Le prochain chapitre contient un relevé de la littérature sur la pratique mentale, et plus spécifiquement, sur l'importance de l'imagerie motrice dans un entraînement mentale. L'imagerie motrice est discuté d'un point de vue comportementale, physiologique et cérébro-fonctionnel et un nouveau modèle visant à souligner l'importance de ce processus en pratique mentale est élaboré. Finalement, l'article discute de certaines considérations importantes quant à l'utilisation de la pratique mentale dans un contexte de réadaptation physique. La première étude effectuée avec la nouvelle tâche de séquence du pied est ensuite décrite au chapitre 3. Le but général de celle-ci était de valider le nouvel instrument en tant que tâche d'apprentissage d'habileté, avec des populations d'âges différents et avec des patients atteints d'une lésion cérébrale. Une fois l'instrument de mesure adopté, une seconde étude, présentée au chapitre 4, a été mise sur pied dans le but de mettre à l'épreuve l'hypothèse principale voulant que l'imagerie motrice joue un rôle clef en pratique mentale. Cette étude d'envergure comprend, non seulement une phase d'apprentissage d'une habileté s'étendant sur plusieurs semaines, mais aussi une évaluation de la rétention des acquis plusieurs mois après un entraînement avec différent type de pratique mentale. Le chapitre 5 s'avère une étude de cas qui met à l'épreuve certaines des connaissances acquises sur la pratique par imagerie motrice lors des études précédentes, mais cette fois, avec un patient présentant une hémiplégié à la suite d'un accident vasculaire cérébral. Le chapitre 6 consiste en l'étape ultime de cette thèse, soit l'exploration à l'aide de la TEP, des changements cérébraux associés à l'apprentissage par imagerie motrice. Ainsi, la réorganisation corticale et sous-corticale provoquée par une pratique mentale intense par imagerie motrice est dévoilée, aidant ainsi à la compréhension de ce phénomène. Le dernier chapitre de cette thèse, la discussion générale, se veut une analyse critique des résultats accumulés au cours des dernières années dans le cadre de mon projet. Voici donc en quelque sorte le canevas de ma thèse qui, comme vous le constaterez dans les pages qui suivent, s'est avérée une aventure enrichissante dans un domaine encore peu exploité.

CHAPITRE 2

ARTICLE 1:

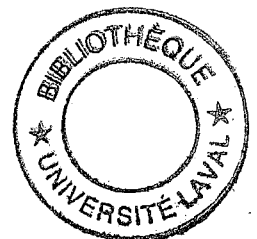
POTENTIAL ROLE OF MENTAL PRACTICE USING MOTOR IMAGERY IN
NEUROLOGIC REHABILITATION

Publié en 2001 dans

Archives of Physical Medicine & Rehabilitation, Volume 82, pp.1133-1141

Résumé

Pour plusieurs personnes ayant subi un dommage cérébral affectant la motricité, la réadaptation physique est pénible et ne génère pas les résultats escomptés, même lorsqu'il y a eu une prise en charge précoce. Ainsi, plusieurs chercheurs ont proposé d'autres méthodes pouvant s'ajouter à la réadaptation traditionnelle, et possiblement bonifier celle-ci. L'un des outils souvent proposés est la pratique mentale de mouvements. Très peu de données scientifiques supportent l'efficacité d'une telle méthode d'entraînement dans un contexte de réadaptation. Cet article discute du rationnel justifiant l'utilisation de la pratique mentale à des fins de réadaptation motrice. Tout d'abord des données psychophysiques, neurophysiologiques et d'imagerie cérébrale, démontrant le lien étroit qui existe entre les mouvements exécutés et les mouvements imaginés, sont revues. Par la suite, la discussion s'étend à la répétition de ces mouvements dans la pratique physique et la pratique mentale, qui ont tous deux le potentiel d'améliorer la performance d'une habileté motrice. Pour terminer, un nouveau modèle est proposé afin de souligner le rôle clé que joue l'imagerie motrice dans la pratique mentale. Nous espérons convaincre les lecteurs du potentiel de cette forme d'entraînement en réadaptation physique et ainsi stimuler l'intérêt pour la recherche appliquée dans ce domaine.



Potential role of mental practice using motor imagery in neurologic rehabilitation

Philip L. Jackson, MPs^{1,3}, Martin F. Lafleur, BSc^{1,3}, Francine Malouin, Ph.D^{2,3}, Carol L. Richards, PhD^{2,3}, & Julien Doyon, PhD^{3,4}

¹Department of Psychology, ²Department of Rehabilitation, Laval University, Quebec, Quebec, Canada, ³Rehabilitation Institute of Quebec, Quebec, Canada, and ⁴Department of Psychology, University of Montreal, Montreal, Canada.

This work was supported through a grant from the Fonds de la Recherche en Santé du Québec (FRSQ) to CLR, FM and JD, and through a doctoral scholarship from the Réseau provincial de recherche en adaptation-réadaptation (REPAR-FRSQ) to PLJ.

Corresponding Author and Reprint Requests:

Julien Doyon, Ph.D.

Département de psychologie

Université de Montréal

C.P. 6128, Succ. Centre-ville

Montréal (Québec)

Canada, H3C 3J7

Phone: 1-514-343-6502

Fax: 1-514-343-5787

E-mail: julien.doyon@umontreal.ca

Abstract

For many patients with damage to the central nervous system, the execution of motor tasks is very difficult, sometimes impossible, even after early participation in an active rehabilitation program. Several investigators have recently proposed that mental practice could be used by these patients as a therapeutic tool to improve their performance of motor functions. Yet, very little empirical work addresses this issue directly. This article discusses the rationale for investigating the potential of mental practice as a means of promoting motor recovery in patients with a neurological disorder. We first present evidence supporting the existence of a similarity between executed and imagined actions using data from psychophysical, neurophysiological and brain imaging studies. This parallel is then extended to the repetition of movements during physical and mental practice of a motor skill. Finally, a new model is proposed to emphasize the key role of motor imagery as an essential process of mental practice, and also stimulate additional research on this type of training in the rehabilitation of patients with motor impairments of cerebral origin.

Introduction

Humans have the ability to generate mental correlates of perceptual and motor events without any triggering external stimulus, a function known as imagery. Studies of this process come from different areas of research such as sport psychology, cognitive psychology and more recently, cognitive neuroscience. Each area has its own vocabulary, which can sometimes create confusion. A definition of the different concepts of imagery used in this paper is hereby proposed. *Mental imagery* refers to the active process by which humans relive sensations with or without external stimuli. This cognitive operation can be performed in different modalities such as visual, auditory, tactile, kinesthetic, olfactory, gustatory, or any combination of these senses. *Movement imagery* is a general term that describes the process of imaging the movement of an object or a person. For instance, mental rotation is a form of movement imagery in which subjects have to rotate a geometric figure mentally in order to identify its shape. When the human body is involved, however, researchers have preferred to use the term *motor imagery* (MI), which corresponds to an active process during which the representation of a specific action is internally reproduced within working memory without any motor output.¹ Finally, the concept of kinesthetic imagery has also been proposed, especially in the context of athletic training, to emphasize the importance of the kinesthetic component of a movement over its visual aspect.

In contrast to the imagery process *per se*, *mental practice* (MP), also called mental or symbolic rehearsal, consists of a training method by which the internal reproduction of a given motor act is repeated extensively with the intention of improving performance. To avoid confusion with MI, we believe it is important to reiterate the distinction drawn by Ravey² between the process of imagining a movement once or a few times (i.e., MI) and the act of repeating the imagined movements several times with the intention of learning a new ability or perfecting a known skill (i.e., MP). Thus, MI will refer to a specific cognitive operation, while MP will designate a training method that can use various cognitive processes, including MI.

Several studies in sport psychology have shown that MP can be effective in optimizing the execution of movements in athletes and help novice learners in the incremental acquisition of new skilled behaviors.³⁻⁵ Moreover, in recent years, a growing body of research has demonstrated that there exist psychophysical as well as physiological similarities between physically executed and imagined movements.⁶⁻⁹ Based on such findings, many investigators have proposed the use of MP in physical rehabilitation as a cost-efficient means of promoting motor recovery after damage to the central nervous system.¹⁰⁻¹³ A review of the literature on MP reveals, however, that only a few modest attempts¹⁴ to apply MP in a rehabilitation context have been conducted to date. One possible reason for this lack of experimental evidence is that theoretical and practical guidelines as to how and when to implement MP in the physical rehabilitation of patients are still scarce. Moreover, the instruments used to measure improvement in performance might be insensitive to the type and the magnitude of changes that can be observed with MP. In this paper, the rationale behind the clinical use of MP is examined by outlining the importance of MI in this mode of training.

Motor Imagery

Over the past 20 years, there has been a considerable increase in the number of experiments investigating the psychophysical and physiological correlates of MI. In general, the results of these studies indicate that the timing of movements, either performed physically or imagined, is subject to common laws and principles. Indeed, it has been shown that Fitt's law, which states that more difficult movements take more time to produce physically than easier ones, applies also to imagined movements.⁶ This conclusion is based on the findings of a series of experiments in normal control subjects that examined the temporal relationship between the execution of a motor task and the imagination of the same action (i.e., mental chronometry).^{6,15-17} The temporal congruence between imagined and executed movements has also been observed after damage to the brain. Decety and Boisson¹⁸ found that patients with unilateral cerebral lesions took more

time to imagine a movement with their affected limb than with their non-affected limb. On the other hand, patients with a paraplegia or a tetraplegia due to lesions of the spinal cord produced imagined movement times comparable to those of healthy subjects,¹⁶ hence supporting the idea that MI is a process that depends on the integrity of motor related structures restricted to the cerebrum. These results indicate that patients with a brain lesion affecting the motor system are likely to be able to imagine movements, but that their performance, either physical or imagined, is affected similarly. Altogether, these findings support the idea that the structures or systems mediating the mental simulation and the physical execution of actions are alike.

Additional confirmation of functional similarity between executed and imagined movements comes from numerous studies which have demonstrated an increase in the heart and respiration rates of subjects engaged in the MI of effortful actions.^{7,19-21} In general, the results of these studies have shown that changes in subjects' autonomic reactions are larger than what would be expected considering that no movement is produced. Based on such findings, Decety and collaborators have proposed that during imagined activities, a significant portion of the observed increase in autonomic response is of central origin,^{22,23} as though the mind deludes the body into believing that some movements are being executed.

More evidence of the correspondence between imagined and executed movements is also provided through functional brain imaging studies with healthy subjects. At first, the findings from a series of experiments with single photon emission computed tomography (SPECT) demonstrated that the neural substrate involved in the imagination of movements were different from those implicated in the execution of the same movements.²⁴⁻²⁶ However, the advent of other brain mapping techniques such as positron emission tomography (PET), functional magnetic resonance imaging (fMRI), electroencephalography (EEG) and magnetoencephalography (MEG) allowed a more precise anatomical localization of the cerebral structures implicated in the performance of

imagined and executed movements of the upper limb. The results of these studies are summarized in Table 1.

Insert Table 1 about here

Altogether, these findings suggest that the supplementary motor area (SMA), cerebellum, as well as the premotor, cingulate, superior and inferior parietal and sensorimotor/primary motor cortices are often found to be involved in both the execution and the imagination of upper limb movements. Recent data from a PET study in our laboratory have confirmed this anatomical correspondence and extended these results to a motor learning paradigm involving the acquisition of a sequence of movements of the left foot in healthy subjects (Lafleur et al., 2002). Indeed, changes in regional cerebral blood flow (rCBF) associated with physical execution of the sequence early in the learning process were observed bilaterally in the dorsolateral premotor cortex and cerebellum, as well as in the left inferior and superior parietal lobules and in the right SMA. After a one-hour training period, however, these motor regions were no longer significantly activated, suggesting that they are critical for establishing the cognitive strategies and motor routines involved in executing a sequence of movements of the foot. In contrast, after practice, an increased level of activity was seen bilaterally in the rectus gyrus and striatum, as well as in the left anterior cingulate and inferior parietal lobule, suggesting that these structures allow the development of a long lasting representation of the sequence. Most importantly, a similar pattern of dynamic changes was observed in the motor imagery conditions in both learning phases, that is, before and after intensive physical practice. These data suggest that the plasticity that occurs during the incremental acquisition of a motor sequence can also be observed during the imagination of this skilled behavior. Finally, no significant change in blood flow was observed in the primary motor area during the imagined conditions, which is probably due to the limited spatial resolution of the brain mapping technique used, as pointed out by other investigators.^{27,28}

Although results from brain imaging experiments generally suggest that executed and imagined movements share a common neural substrate, two major issues remain unresolved. First, subtle differences in the site of activation between these conditions have been reported within the SMA and cerebellum.²⁹⁻³² Although still conjectural, such anatomical distinctions may be related to the voluntary inhibition necessary to prevent muscle contraction and movement during MI.^{9,33,34} Second, the role of the primary motor cortex during mental simulation of movement continues to nurture debate.³⁵ Before 1995, none of the published functional brain imaging studies have reported a significant activation of this area during MI. For example, as in our own study, investigators who used PET failed to demonstrate a significant change of rCBF in the primary sensorimotor cortex while subjects were scanned in an imagined condition.^{28,31,36,37} In contrast, recent experiments using imaging techniques that provide better temporal or spatial resolution, such as EEG,³⁸ MEG^{39,40} and fMRI,^{9,32,35,41-43} have shown that the primary motor cortex is activated during MI, albeit to a lesser degree than when movements are actually performed. Thus, the role of this structure in the simulation of movement is a strong argument in favor of a functional similarity between imagined and executed movements, although its precise contribution in MI still needs to be clarified.

A final source of evidence supporting the notion of congruence between imagined and physically performed activities is provided by experiments measuring changes in the excitability of motor neurons in the nervous system. Several researchers have used transcranial magnetic stimulation (TMS) to apply a focused magnetic field to the motor cortex of subjects while recording motor evoked potentials (MEP) in the contralateral muscles. The goals of these studies were to determine whether a similar facilitation effect occurs during both MI and the physical execution of movements, as well as to investigate whether the temporal pattern of cortical activation coincided in both cases. The results have shown that MI elicits an increase in cortical excitability when compared to a rest control condition,^{8,34,44-48} and that the dynamic pattern of cortical activation during

imagined movements is similar to the one observed when actual activities are performed.^{8,45-48} In these experiments, however, the reported modulation in cortical excitability during MI could, in fact, be caused by an increase in spinal activity. To test this hypothesis, many investigators have examined the level of spinal excitability during imagined movements using measures such as H-reflexes, T-reflexes and F-waves. A careful review of these studies reveals two opposing patterns of results. First, some researchers have reported modulations in the level of excitability of the spinal cord^{20,48-51} which can, however, be accounted for by methodological biases. For instance, in some studies,⁴⁹⁻⁵¹ the increase in spinal activity has been associated with an increase in background electromyographic activity of the muscle engaged in MI, implying that subjects moved or contracted their muscle. These small movements or muscle contractions have previously been shown to produce increases in the level of spinal reflex activity.^{52,53} Other factors that could modulate spinal excitability during MI include the level of proficiency in the task, the imagery instructions given to the subjects, as well as the imagery abilities of subjects. In contrast, the second and most prominent pattern of results reveals that the level of activity in the spinal reflex pathway remains unchanged when subjects are engaged in MI,^{34,45,46,54,55} suggesting that this type of process does not send descending volleys to the spinal cord, as actual movements do. Therefore, although imagined activities produce a pattern of dynamic changes in the excitability of motor neurons resembling that of executed movements, this similarity seems restricted to the cerebral level.

Mental Practice

The idea that mental practice (MP) can enhance the learning of motor skills is far from new. Using measures of spatial accuracy of movements and execution time, several studies in the sport psychology literature have previously demonstrated that MP can improve the performance of motor skill behaviors.^{3-5,56} These studies have generally shown that volunteers who train mentally on a specific task usually display less improvement than those who train physically, although MP leads to superior increases in performance compared to a no practice condition.⁴

Further evidence that physical practice and MP share several attributes was recently provided by Yaguez and colleagues.⁵⁷ These researchers have shown that a 10-minute period of MP was sufficient to improve the performance of a task in which healthy subjects were required to draw ideograms of different sizes. As opposed to most studies of MP that have used speed and accuracy as dependant measures, the improvement reported by Yaguez and collaborators involved the dynamics of movement. According to these investigators, the changes in performance were unlikely to be open to introspection or verbal analysis, which suggests that part of the learning observed following MP of a grapho-motor task can be implicit in nature. Such findings underline the importance of having instruments that can detect performance changes across several outcome measures.

Gains in isometric muscular strength have also been observed following MP. For example, Cornwall and colleagues⁵⁸ have found that subjects who trained mentally to contract their quadriceps showed a greater increase in isometric muscle strength than volunteers in a no-practice control group. Similarly, Yue & Cole¹³ have reported gains in isometric strength after MP. They found that after four weeks of training, subjects in the physical, mental and no-practice groups increased the strength of the abductor muscle of the fifth finger by 30%, 22%, and 3.7% respectively, although no muscle hypertrophy was observed. These investigators interpreted their results according to the Neural Training Hypothesis,^{59,60} which stipulates that in the first phase of muscle training, the increases in strength are caused by adaptive changes in central processes rather than by a hypertrophy of the muscles. They suggested that the gains observed after MP could be attributable to neural changes at the programming/planning levels of the motor system.¹³ More recently, however, another study conducted by Herbert, Dean and Gandevia⁶¹ failed to replicate these results and found that, compared to physical practice, MP did not produce any increase in voluntary isometric strength of the elbow flexor. Moreover, the Neural Training Hypothesis was tested in this experiment by measuring maximal voluntary contraction with the twitch interpolation technique before and after training. The authors found that neither physical nor mental practice increased voluntary activation of the muscles involved. It was pointed out, however, that maximal voluntary activation of the

elbow flexor was already very high in the subjects, leaving little room for improvement.⁶¹ Thus, the investigators proposed that MP could produce more significant effects on muscles that exhibit low initial levels of voluntary contraction. This hypothesis remains to be confirmed if the Neural Training explanation is to gain further support.

Although the behavioral effects of MP on the learning of a motor skill have been investigated using different types of paradigms, only a few studies have examined physiological correlates of the changes in performance. In one of these studies, Roure and colleagues⁶² used autonomic measures (e.g., skin potential and resistance, heart rate, respiratory frequency) to rate the quality of the imagery that subjects engaged in during MP. They reported a positive correlation between the performance gain on a volleyball task following MP and the rating of the level of imagery intensity. This result suggests that better imagers (i.e. individuals who produced autonomic nervous system responses on the greater number of trials in the imagined condition) improved more on the task than other subjects, supporting the idea that the better the imagery, the better the outcome of MP.

Other evidence in support of the action of MP on motor processes comes from a recent study in healthy subjects that examined the changes in functional reorganization of the brain after this type of rehearsal. Using TMS, Pascual-Leone and collaborators⁶³ have shown modulations in the motor cortical areas involved in a one-handed piano exercise during both physical and mental practice of this skill. They demonstrated that the size of the contralateral cortical output map for the long finger flexor and extensor muscles increased progressively each day, as subjects practiced this task over a period of five days. The increase in size of the representation was equivalent in both physical and mental training conditions. Furthermore, both conditions produced behavioral improvements, although subjects in the physical practice group displayed greater learning after training. The level of performance in the mental practice condition after five days of training was equivalent to that of the physical practice condition after only three days.

These investigators demonstrated, however, that after adding only one physical training session following the five days of MP, subjects who practiced the task mentally reached the same level of performance as those who were in the physical training group. Altogether, these findings suggest that mental training produces representational changes in the brain comparable to those yielded by physical practice, and that part of the behavioral improvement seen in the MP condition may be latent, awaiting to be expressed after minimal physical practice. Mental practice could thus have a preparatory effect on the task, which increases the efficiency of subsequent physical training.⁶³ In fact, different combinations of physical and mental practice have often been shown to be more efficient than either form of training alone.^{64,65} This pattern of results has recently been confirmed in our laboratory using a motor sequence learning task involving the lower limb (Jackson et al., unpublished observations). Our results demonstrated a superior effect of a combined practice condition over either MP or physical practice conditions alone, even though the amount of physical training in the combined condition was minimal (i.e., 10 to 1 ratio) compared to that of MP. This suggests that the effect of MP is greater when physical practice is added, even in small amounts, during long-term training of a motor skill.

In summary, results from different lines of research support the notion that MP, as physical practice, can improve the performance of a motor skill, and that this increase in performance is associated with physiological and plastic changes at the cerebral level. However, controversies still persist regarding the efficiency of this training technique, as many of the variables under study, such as the nature of the motor task, the amount of practice and the learning stage at which MP is introduced, have often not been taken into account when interpreting the results [see ^{56,66} for critical reviews of these methodological factors].

Theories of mental practice

Many theories have been proposed to explain the mechanisms by which mental practice acts to increase performance in motor learning.⁶⁷⁻⁶⁹ Yet, few have been experimentally tested and none offers a satisfactory explanation for the existing findings.^{66,70} For example, Sackett⁶⁷ proposed the Symbolic Learning theory, which states that MP facilitates motor performance by allowing subjects to rehearse the cognitive components of a task. This theory implies that movements are symbolically coded in the central nervous system, making them easier to execute.⁶⁶ The results of several experiments with MP are consistent with this theory, as most meta-analyses of the phenomenon report greater effect sizes for tasks that include a strong cognitive content.^{3,4} The theory, however, does not explain other findings such as the increase in muscular strength reported after MP of isometric contractions.¹³ Indeed, the "cognitive demands" necessary to imagine this type of task are less complex than those required during the performance of other motor acts like producing a sequence of movements or walking around obstacles.

In contrast with the Symbolic Learning theory, the Psychoneuromuscular theory is more compatible with results obtained using tasks that are more "purely" motor. The latter theory proposes that micro-nerve impulses are propagated to target muscles when a subject engages in the MP of a movement, hence facilitating future performance by priming specific "mental nodes" or "patterns of movement" necessary to execute a motor task.⁷¹ Evidence in support of this theory comes from a study by Jacobson⁶⁸ in which he recorded an increase in intramuscular activity while subjects were imagining movements. However, Feltz & Landers⁴ raised the possibility that such increase in muscular activity during MP is not specific to the muscle groups involved in the execution of the movement. In fact, in a study where the EMG activity of several muscle groups was monitored, increases were found not only in the target muscles but in non-related muscle groups as well.⁷² Such results are probably responsible for the decrease in popularity of the Psychoneuromuscular theory.

A third theory about the effects of MP in motor learning comes from Paivio,⁶⁹ who suggested that MP enhances performance by acting on both the motivational and cognitive components of an activity at either general (e.g., the degree of physiological arousal of an individual) or specific levels (e.g., the actual practice of a motor task using MI). Van Leeuwen and Inglis¹¹ have recently modified this theory from a neurological rehabilitation perspective. They rightfully argue that a large part of the preoccupation in rehabilitation is given to the physical components of the training, often neglecting the patients' motivational conditions. According to this view, MP would help patients focus on specific goals and could contribute to a reduction of the depressive state frequently observed in neurological disorders. In addition, at the cognitive level, it is argued that the use of MP would improve the patients' ability to acquire specific skills and promote the elaboration of strategies that could eventually be generalized outside the clinic. This theory, however, fails to identify the key role of one specific type of imagery (i.e. motor imagery) that can be used during MP of a motor skill.

Training in neurological rehabilitation: a new conceptualization of mental practice

As evident from the brief description of the theories of MP presented above, most of them have focused predominantly on either the motor, cognitive or motivational processes underlying the changes in performance over time. Although the contribution of each of these components to the learning of skilled behaviors through MP is undeniable, each theory taken separately cannot explain all of the inconsistencies encountered between studies in this area of research. Furthermore, it is often difficult to tease these components out and to measure their distinct contribution, as they interact during the acquisition process. Consequently, this distinction along the motor and cognitive axes is difficult to test experimentally and not easily applicable to clinical issues.

An alternative framework is proposed here in an attempt to elaborate a unified and practical model of the potential therapeutic effects of MP relative to other forms of training employed in neurological rehabilitation. This new model is based on some

historical and contemporary theories of MP,^{11,67,69,73-75} as well as notions taken from research in motor imagery⁷⁶ and motor skill learning⁷⁷⁻⁸⁰ (see Figure 1).

Insert Figure 1 about here

The present model acknowledges the fact that motor, cognitive and psychological factors contribute to the outcome of different forms of practice, including MP. However, we propose that up to three distinct levels of learning processes can contribute and interact with one another during practice of an activity depending on the form of training used: declarative knowledge, non-conscious processes, and physical execution. In this model, the declarative knowledge refers to the information about the skill that subjects need to know explicitly before practicing a given motor task, such as the limbs involved in producing the movement or the sequence and direction of the movements to be performed. The non-conscious processes correspond to aspects of the skill not directly accessible to a verbal description by an individual, such as the timing between a cue and a specific motor program, the coarticulation of small segments of movements into a unified sequence, and the rapid and sequential activation / inhibition of different muscle groups. Finally, the physical execution refers to the musculo-skeletal activity necessary to carry out the intended action. As demonstrated in Figure 1, different types of training approaches can use either one, two or all three of these levels of processing. The outcome of each training method can then be measured either through improvement in performance, changes in cerebral organization, or an increase in the subjects' level of arousal and motivation.

According to this model, the outcome of training would be optimal during physical practice, as all three levels of processing are usually implicated and interacting with one

another. The involvement of each of these levels of processing can also vary during the course of practice. For example, the use of declarative knowledge known by subjects can be more important at the beginning of training than when the task is well learned. Mental practice with MI has also been shown to be beneficial for the learning of several motor tasks. In this form of practice, the mechanism underlying the improvement also depends on the interaction between the declarative knowledge and the non-conscious processes involved in acquiring the skill. Contrary to the condition where a motor task can be learned implicitly with physical practice [e.g.,⁸¹], MP with MI requires that subjects have all the necessary declarative knowledge about the different components of the task before practicing. However, as with physical practice, the rehearsing of the task with MI can also give access to the non-conscious processes involved in learning the skilled behavior. Indeed, the findings presented in previous sections on the similarity of the circuitry involved in imagining and executing movements suggest that the neuronal network implicated in the non-conscious aspects of a task can be primed with MP. Our model predicts that internally driven images, which promote the kinesthetic "feeling" of movements,⁵⁶ would best activate the different non-conscious processes involved during motor task training. Indeed, there is some evidence, although still controversial,⁸² that motor imagery performed using a first-person perspective (i.e. internally) yields better improvement after MP than when performed in the third-person perspective.⁸³⁻⁸⁵ Thus, mental practice with MI can be conceptualized as an "explicit access" to the otherwise non-conscious learning processes involved in the task. However, the absence of direct feedback from the execution system makes MP a less potent training method than physical practice.

Finally, non-specific MP (also called mental preparation³) is a more general type of practice that comprises many different approaches aimed at improving motor performance, such as psyching-up strategies and relaxation. This holistic way of rehearsing often involves an emotional content aimed towards winning or optimizing the execution of a certain skill. It is thought to be less effective than physical practice and MP with MI because it does not tap into any of the non-conscious processes of a skill as those

involved remain accessible to verbal analysis. Such a form of practice can nevertheless lead to some improvement in performance, probably by acting on general processes such as the development of learning strategies applicable to any movement and the enhancement of motivation.^{11,69}

We believe that this new conceptualization of MP and skill learning is interesting not only because it helps understand most of the results in the literature, but also, because it provides practical guidelines for the implementation of this training technique at different stages of the rehabilitation process.

Mental Practice in Neurological Rehabilitation

As presented in the previous sections of this paper, there is now sufficient evidence to foster the idea that MP can improve the learning of motor skill in healthy individuals. Furthermore, the model presented above underlines the importance of motor imagery as an essential component of MP. In the present section, we now discuss some theoretical and practical issues related to the application of this new approach in neurological rehabilitation.

First and foremost, it is important to note that the superiority of physical over mental practice in several studies of motor skill learning^{4,65,86} suggests that MP should be considered as a complement to physical rehabilitation, and not as an alternative method. Second, as proposed in our model, the capacity to generate imagined movements is necessary for MP to be most effective. In fact, recent evidence suggests that lesions restricted to the parietal lobes can impair MI,⁸⁷ implying that some neurological patients may not benefit from MP. Other results supporting this notion come from a recent study by Yaguez and his co-workers,⁸⁸ who found that some disorders of the basal ganglia influence the use of MP. These authors compared the ability to learn grapho-motor trajectories in a group of patients with Parkinson's disease (PD) with that of a group of

patients with Huntington's disease (HD) after a 10-minute training period using MI. Their results showed that MP helped the performance of patients with HD, but not that of patients with PD. It was further demonstrated that PD patients did not learn the task with physical practice, nor did they perform well on measures of visual imagery. In the HD group, a negative correlation was also found between the degree of atrophy in the caudate nucleus and performance on the visual imagery tasks, suggesting that atrophy of the caudate nucleus could specifically affect visual imagery, without hampering motor imagery. Thus, these findings suggest that not only lesions to the cortex, but damage to subcortical structures may reduce patients' ability to produce the appropriate imagery process. They also stress the importance of assessing the MI ability of patients before considering using MP as a therapeutic means.

To assess MI abilities, several clinical clues based on psychophysical, physiological and neuroanatomical correlates of MI can be obtained. In the clinical setting, as noted previously, it has been shown that patients with a stroke are slower when they imagine performing movements with their affected limb than with the non-affected limb.^{18,89} Thus, the manifestation of the patient's motor deficit in the timing of the imagined task would be a good indicator that MI is being performed adequately, i.e., using a motor-related circuitry that is analogous to the one used during physical execution of the task. Another clue suggesting that patients have some control over the imagery process is that the time taken to imagine a movement is similar from one trial to the next. Both of these chronometric measures are technically easy to obtain following appropriate instructions, and could be used to evaluate MI abilities in patients with cerebral damage.

Third, once the patients' capacity to produce MI is assessed, the focus can then be directed to the severity of the motor impairment, and the moment at which MP should be introduced in the treatment. In cases where the neurological condition does not allow the patients to produce movements, the rehearsing of a skill with MI is believed to help keep the motor program active, thus priming and facilitating the future execution of specific

movements.⁶³ At this stage of the rehabilitation process, MP is expected to act on the declarative knowledge and non-conscious levels of learning by improving respectively, amongst other processes, the level of retention of a pattern of movements and the rehearsing of the neuronal network involved in the skill. For patients with spared functions or for patients with partial recovery who need to learn new skills (e.g., walking with a cane), the addition of physical practice to MP is thought to promote learning by further reinforcing processes at the non-conscious level. Feedback obtained from executing targeted movements during physical rehabilitation would help produce more realistic and efficient MI, hence increasing the potential of MP and possibly accelerating the rate of recovery. Mental practice could thus be used to multiply the number of repetitions of a movement at the cerebral level,⁷⁴ without adding to the physical demands of training. This method might also be useful after the patient's discharge from the rehabilitation center, in order to maintain gains acquired with training, and possibly lead to additional improvement. In fact, beneficial effects of extensive practice using various techniques have been reported in chronic stroke patients.^{90,91} The combination of MP with such techniques could extend the time spent practicing tasks, and therefore the magnitude of the improvement in performance.

In conclusion, we believe that the therapeutic potential of MP with MI is more than a leap of faith and can be expressed as a reasonable working hypothesis that needs to be tested. More specifically, it will be useful to elaborate guidelines to determine the best timing to introduce MP in the rehabilitation process. Additional important clinical issues that await further support include the selection of patients most likely to benefit from MP, the effects of cognitive deficits after brain lesion on the ability to imagine movements, the choice of instruments able to detect small changes in performance, as well as the use of a technological medium such as virtual reality in MP. We believe that the main question is no longer whether MP can help in the rehabilitation of neurological patients,² but rather, what is the best way to implement this cost-efficient technique into current practice.

Acknowledgements

We would like to thank the *Fonds de Recherche en Santé du Québec, Réseau provincial de recherche en adaptation-réadaptation* and *Institut de Recherche en Déficience Physique de Québec* for their financial support. We also extend our gratitude to Isabelle Deaudelin for her technical assistance and to the reviewers for their insightful comments on an earlier version of this manuscript.

References

1. Decety J, Grèzes J. Neural Mechanisms Subserving the Perception of Human Actions. *Trends in Cognitive Sciences* 1999;3:172-8.
2. Ravey J. In response to: Mental practice and imagery: a potential role in stroke rehabilitation. *Phys Ther Rev* 1998;3:53-4.
3. Driskell JE, Copper C, Moran A. Does mental practice enhance performance? *J Appl Psychol* 1994;79:481-92.
4. Feltz DL, Landers DM. The effects of mental practice on motor skill learning and performance: A meta-analysis. *J Sport Psychol* 1983;5:25-57.
5. Hinshaw KE. The effects of mental practice on motor skill performance: Critical evaluation and meta-analysis. *Imagin Cogn Personality* 1991;11:3-35.
6. Decety J, Jeannerod M. Mentally simulated movements in virtual reality: does Fitts's law hold in motor imagery? *Behav Brain Res* 1996;72:127-34.
7. Wuyam B, Moosavi SH, Decety J, Adams L, Lansing RW, Guz A. Imagination of dynamic exercise produced ventilatory responses which were more apparent in competitive sportsmen. *J Physiol (Lond)* 1995;482:713-24.
8. Fadiga L, Buccino G, Craighero L, Fogassi L, Gallese V, Pavesi G. Corticospinal excitability is specifically modulated by motor imagery: a magnetic stimulation study. *Neuropsychologia* 1999;37:147-58.
9. Leonardo M, Fieldman J, Sadato N, Campbell G, Ibanez V, Cohen L, et al. A functional magnetic resonance imaging study of cortical regions associated with motor task execution and motor ideation in humans. *Hum Brain Mapp* 1995;3:83-92.
10. Decety J. Should motor imagery be used in physiotherapy?: Recent advances in cognitive neurosciences. *Physio Theory Pract* 1993;9:193-203.
11. Van Leeuwen R, Inglis JT. Mental practice and imagery: a potential role in stroke rehabilitation. *Phys Ther Rev* 1998;3:47-52.

12. Warner L, McNeill ME. Mental imagery and its potential for physical therapy. *Phys Ther* 1988;68:516-21.
13. Yue G, Cole KJ. Strength increases from the motor program: comparison of training with maximal voluntary and imagined muscle contractions. *J Neurophysiol* 1992;67:1114-23.
14. Korn ER. The use of altered states of consciousness and imagery in physical and pain rehabilitation. *J Mental Imagery* 1983;7:25-34.
15. Cerritelli B, Maruff P, Wilson P, Currie J. The effect of an external load on the force and timing components of mentally represented actions. *Behav Brain Res* 2000;108:91-6.
16. Decety J, Michel F. Comparative analysis of actual and mental movement times in two graphic tasks. *Brain Cogn* 1989;11:87-97.
17. Parsons LM. Temporal and kinematic properties of motor behavior reflected in mentally simulated action. *J Exp Psychol Hum Perc Perform* 1994;20:709-30.
18. Decety J, Boisson D. Effect of brain and spinal cord injuries on motor imagery. *Eur Arch Psychiatry Neurol Sci* 1990;240:39-43.
19. Deschaumes-Molinario C, Dittmar A, Vernet-Maury E. Autonomic nervous system response patterns correlate with mental imagery. *Physiol Behav* 1992;51:1021-7.
20. Oishi K, Kimura M, Yasukawa M, Yoneda T, Maeshima T. Amplitude reduction of H-reflex during mental movement simulation in elite athletes. *Behav Brain Res* 1994;62:55-61.
21. Thill EE, Bryche D, Poumarat G, Rigoulet N. Task-involvement and ego-involvement goals during actual and imagined movements: their effects on cognitions and vegetative responses. *Behav Brain Res* 1997;82:159-67.
22. Decety J. Do imagined and executed actions share the same neural substrate? *Brain*

Res Cogn Brain Res 1996;3:87-93.

23. Decety J. The neurophysiological basis of motor imagery. *Behav Brain Res* 1996; 77:45-52.
24. Ingvar DH, Philipson L. Distribution of cerebral blood flow in the dominant hemisphere during motor ideation and motor performance. *Ann Neurol* 1977;2:230-7.
25. Roland PE, Larsen B, Lassen NA, Skinhoj E. Supplementary motor area and other cortical areas in organization of voluntary movements in man. *J Neurophysiol* 1980;43:118-36.
26. Gelmers HJ. Cortical organization of voluntary motor activity as revealed by measurement of regional cerebral blood flow. *J Neurol Sci* 1981;52:149-61.
27. Decety J. Neural representations for action. *Rev Neurosci* 1996;7:285-97.
28. Deiber MP, Ibanez V, Honda M, Sadato N, Raman R, Hallett M. Cerebral processes related to visuomotor imagery and generation of simple finger movements studied with positron emission tomography. *NeuroImage* 1998;7:73-85.
29. Tyszka JM, Grafton ST, Chew W, Woods RP, Colletti PM. Parceling of mesial frontal motor areas during ideation and movement using functional magnetic resonance imaging at 1.5 tesla. *Ann Neurol* 1994;35:746-9.
30. Sanes JN, Donoghue JP. Static and dynamic organization of motor cortex. *Adv Neurol* 1997;73:277-96.
31. Stephan KM, Fink GR, Passingham RE, Silbersweig D, Ceballos-Baumann AO, Frith CD, et al. Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects. *J Neurophysiol* 1995;73:373-86.
32. Luft AR, Skalej M, Stefanou A, Klose U, Voigt K. Comparing motion- and imagery-related activation in the human cerebellum: A functional MRI study. *Hum Brain Mapp* 1998;6:105-13.
33. Berthoz A. The role of inhibition in the hierarchical gating of executed and

- imagined movements. *Brain Res Cogn Brain Res* 1996;3:101-13.
34. Stephan KM, Frackowiak RS. Motor imagery-anatomical representation and electrophysiological characteristics. *Neurochem Res* 1996;21:1105-16.
 35. Roth M, Decety J, Raybaudi M, Massarelli R, Delon-Martin C, Segebarth C, et al. Possible involvement of primary motor cortex in mentally simulated movement: a functional magnetic resonance imaging study. *NeuroReport* 1996;7:1280-4.
 36. Jueptner M, Ottinger S, Fellows SJ, Adamschewski J, Flerich L, Muller SP, et al. The relevance of sensory input for the cerebellar control of movements. *NeuroImage* 1997;5:41-8.
 37. Seitz RJ, Canavan AG, Yaguez L, Herzog H, Tellmann L, Knorr U, et al. Representations of graphomotor trajectories in the human parietal cortex: evidence for controlled processing and automatic performance. *Eur J Neurosci* 1997;9:378-89.
 38. Beisteiner R, Hollinger P, Lindinger G, Lang W, Berthoz A. Mental representations of movements. Brain potentials associated with imagination of hand movements. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1995;96:183-93.
 39. Lang W, Cheyne D, Hollinger P, Gerschlager W, Lindinger G. Electric and magnetic fields of the brain accompanying internal simulation of movement. *Brain Res Cogn Brain Res* 1996;3:125-9.
 40. Schnitzler A, Salenius S, Salmelin R, Jousmaki V, Hari R. Involvement of primary motor cortex in motor imagery: a neuromagnetic study. *NeuroImage* 1997;6:201-8.
 41. Porro CA, Francescato MP, Cettolo V, Diamond ME, Baraldi P, Zuiani C, et al. Primary motor and sensory cortex activation during motor performance and motor imagery: a functional magnetic resonance imaging study. *J Neurosci* 1996;16:7688-98.
 42. Sabbah P, Simond G, Levrier O, Habib M, Trabaud V, Murayama N, et al.

Functional magnetic resonance imaging at 1.5 T during sensorimotor and cognitive task. *Eur Neurol* 1995;35:131-6.

43. Lotze M, Montoya P, Erb M, Hulsmann E, Flor H, Klose U, et al. Activation of cortical and cerebellar motor areas during executed and imagined hand movements: An fMRI study. *J of cogn neurosc* 1999;11:491-501.
44. Abbruzzese G, Assini A, Buccolieri A, Marchese R, Trompetto C. Changes of intracortical inhibition during motor imagery in human subjects. *Neurosci Lett* 1999;263:113-6.
45. Hashimoto R, Rothwell JC. Dynamic changes in corticospinal excitability during motor imagery. *Exp Brain Res* 1999;125:75-81.
46. Kiers L, Fernando B, Tomkins D. Facilitatory effect of thinking about movement on magnetic motor-evoked potentials. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1997;105:262-8.
47. Rossi S, Pasqualetti P, Tecchio F, Pauri F, Rossini PM. Corticospinal excitability modulation during mental simulation of wrist movements in human subjects. *Neurosci Lett* 1998;243:147-51.
48. Rossini PM, Rossi S, Pasqualetti P, Tecchio F. Corticospinal excitability modulation to hand muscles during movement imagery. *Cereb Cortex* 1999;9:161-7.
49. Bonnet M, Decety J, Jeannerod M, Requin J. Mental simulation of an action modulates the excitability of spinal reflex pathways in man. *Brain Res Cogn Brain Res* 1997;5:221-8.
50. Gandevia SC, Wilson LR, Inglis JT, Burke D. Mental rehearsal of motor tasks recruits alpha-motoneurons but fails to recruit human fusimotor neurons selectively. *J Physiol (Lond)* 1997;505:259-66.
51. Ikai T, Findley TW, Izumi S, Hanayama K, Kim H, Daum MC, et al. Reciprocal inhibition in the forearm during voluntary contraction and thinking about movement. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 1996;36:295-304.

52. Abbruzzese G, Morena M, Spadavecchia L, Schieppati M. Response of arm flexor muscles to magnetic and electric brain stimulation during shortening and lengthening tasks in man. *J Physiol (Lond)* 1994;481:499-507.
53. Kasai T, Komiyama T. The timing and the amount of agonist facilitation and antagonist inhibition of varying ankle dorsiflexion force in man. *Brain Res* 1988;447:389-92.
54. Abbruzzese G, Trompetto C, Schieppati M. The excitability of the human motor cortex increases during execution and mental imagination of sequential but not repetitive finger movements. *Exp Brain Res* 1996;111:465-72.
55. Kasai T, Kawai S, Kawanishi M, Yahagi S. Evidence for facilitation of motor evoked potentials (MEPs) induced by motor imagery. *Brain Res* 1997;744:147-50.
56. Hall C, Buckholz E, Fishburne GJ. Imagery and the acquisition of motor skills. *Can J Sport Sci* 1992;17:19-27.
57. Yaguez L, Nagel D, Hoffman H, Canavan AG, Wist E, Homberg V. A mental route to motor learning: improving trajectorial kinematics through imagery training. *Behav Brain Res* 1998;90:95-106.
58. Cornwall MW, Bruscatto MP, Barry S. Effect of mental practice on isometric muscular strength. *J Sports Phys Ther* 1991;13:231-4.
59. Enoka RM, Fuglevand AJ. Neuromuscular basis of the maximum voluntary force capacity of muscle. In: Grabiner MD, editor. *Current issues in Biomechanics*. Champaign: Human Kinetics; 1993. p. 215-35.
60. Sale DG. Neural adaptation to resistance training. *Med Sci Sports Exerc* 1988;20:S135-S145
61. Herbert RD, Dean C, Gandevia SC. Effects of real and imagined training on voluntary muscle activation during maximal isometric contractions. *Acta Physiol Scand* 1998;163:361-8.

62. Roure R, Collet C, Deschaumes-Molinaro C, Delhomme G, Dittmar A, Vernet-Maury E. Imagery quality estimated by autonomic response is correlated to sporting performance enhancement. *Physiol Behav* 1999;66:63-72.
63. Pascual-Leone A, Nguyet D, Cohen LG, Brasil-Neto JP, Cammarota A, Hallett M. Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills. *J Neurophysiol* 1995;74:1037-45.
64. McBride ER, Rothstein AL. Mental and physical practice and the learning and retention of open and closed skills. *Percept Mot Skills* 1979;49:359-65.
65. Richardson A. Mental practice: a review and discussion. I. *Res Q* 1967;38:95-107.
66. Janssen JJ, Sheikh AA. Enhancing athletic performance through imagery : An overview. In: Sheikh AA, Korn ER, editors. *Imagery in Sports and Physical Performance*. Amityville, N.Y.: Baywood Pub. Co.; 1994. p. 1-22.
67. Sackett RS. The influences of symbolic rehearsal upon the retention of a maze habit. *J Gen Psychol* 1934;10:376-95.
68. Jacobson E. Electrophysiology of mental activities. *American Journal of Psychology* 1932;44:677-94.
69. Paivio A. Cognitive and motivational functions of imagery in human performance. *Can J App Sport Sci* 1985;10:22S-8S.
70. Budney AJ, Murphy SM, Woolfolk RL. Imagery and Motor Performance : What Do We Really Know ? In: Sheikh AA, Korn ER, editors. *Imagery in Sports and Physical Performance*. Amityville, N.Y.: Baywood Pub. Co.; 1994. p. 97-120.
71. Mackay DG. The problem of rehearsal or mental practice. *J Motor Behav* 1981;13:274-85.
72. Shaw W. The distribution of muscular action potentials during imaging. *The Psychological Record* 1938;2:195-216.

73. Jacobson E. Electrical measurement of neuromuscular states during mental activities. *Am J Physiol* 1930;94:24-34.
74. Heuer H. A multiple-representation's approach to mental practice of motor skills. In: Kirkcaldy B, editor. *Normalities and abnormalities in human movement*. 1989. p. 36-57.
75. Martin KA, Moritz SE, Hall CR. Imagery use in sport: A literature review and applied model. *Sport Psychologist* 1999;13:245-68.
76. Jeannerod M. Mental imagery in the motor context. *Neuropsychologia* 1995;33:1419-32.
77. Clegg BA, DiGirolamo GJ, Keele SW. Sequence learning. *Trends in Cognitive Sciences* 1998;2:275-81.
78. Willingham DB. A neuropsychological theory of motor skill learning. *Psychol Rev* 1998;105:558-84.
79. Karni A. The acquisition of perceptual and motor skills: a memory system in the adult human cortex. *Brain Res Cogn Brain Res* 1996;5:39-48.
80. Doyon J. Skill learning. In: Schmahmann JD, editor. *The Cerebellum and Cognition: International Review of Neurobiology*, Vol 41, pp. 273-94. San Diego: Academic Press; 1997.
81. Nissen MJ, Bullemer P. Attentional requirements of learning: Evidence from performance measures. *Cognit Psychol* 1987;19:1-32.
82. Mumford B, Hall C. The effects of internal and external imagery on performing figures in figure skating. *Can J App Sp Sci* 1985;10:171-7.
83. Mahoney MJ, Avener M. Psychology of the elite athlete: An exploratory study. *Cognit Ther Res* 1977;1:135-41.
84. Ryan ED, Simons J. Efficacy of mental imagery in enhancing mental rehearsal of motor skills. *Journal of Sport Psychology* 1982;4:41-51.
85. Rotella RJ, Gansneder B, Ojala D, Billing J. Cognitions and coping strategies of

- elite skiers: An exploratory study of young developing athletes. *Journal of Sport Psychology* 1980;2:350-4.
86. Corbin CB. Mental Practice. In: Morgan WP, editor. *Ergogenic Aids and Muscular Performance*. New York: Academic Press; 1972.
 87. Sirigu A, Duhamel JR, Cohen L, Pillon B, Dubois B, Agid Y. The mental representation of hand movements after parietal cortex damage. *Science* 1996;273:1564-8.
 88. Yaguez L, Canavan AG, Lange HW, Homberg V. Motor learning by imagery is differentially affected in Parkinson's and Huntington's diseases. *Behav Brain Res* 1999;102:115-27.
 89. Sirigu A, Cohen L, Duhamel JR, Pillon B, Dubois B, Agid Y, et al. Congruent unilateral impairments for real and imagined hand movements. *NeuroReport* 1995;6:997-1001.
 90. Miltner WH, Bauder H, Sommer M, Dettmers C, Taub E. Effects of constraint-induced movement therapy on patients with chronic motor deficits after stroke : A replication. *Stroke* 1999;30:586-92.
 91. Dean CM, Richards CL, Malouin F. Task-related training improves the performance of locomotor tasks in chronic stroke. A randomized controlled pilot study. *Arch Phys Med Rehabil* 2000; 81:409-17
 92. Decety J, Philippon B, Ingvar DH. rCBF landscapes during motor performance and motor ideation of a graphic gesture. *Eur Arch Psychiatry Neurol Sci* 1988;238:33-8.
 93. Rao SM, Binder JR, Bandettini PA, Hammeke TA, Yetkin FZ, Jesmanowicz A, et al. Functional magnetic resonance imaging of complex human movements. *Neurology* 1993;43:2311-8.
 94. Sanes JN. Neurophysiology of preparation, movement and imagery. *Behavioral and Brain Sciences* 1994;17:221-3.

95. Naito E, Matsumura M. Movement-related slow potentials during motor imagery and motor suppression in humans. *Brain Res Cogn Brain Res* 1994;2:131-7.
96. Cunnington R, Iansek R, Bradshaw JL, Phillips JG. Movement-related potentials associated with movement preparation and motor imagery. *Exp Brain Res* 1996;111:429-36.
97. Green JB, Bialy Y, Sora E, Thatcher RW. An electroencephalographic study of imagined movement. *Arch Phys Med Rehabil* 1997;78:578-81.

Figure Legends

Figure 1: Model representing the various processes involved in three different types of practice. The outcome of the different practice methods can be observed through improvement in performance, changes in cerebral organization and increase in arousal and motivation levels. As more components are interacting during practice, the better the outcome becomes.

Table 1. Brain mapping studies of healthy subjects executing and imagining upper-limb movements

Study + Technique used	Task	Motor-related activated regions										
		pF	pM	sma	Cg	SM	M1	S1	Ps	Pi	Ce	BG
SPECT												
Ingvar & Philipson ²⁴	Clenching of hand	I	√				E		E	√		
Roland et al. ²⁵	Finger-to-thumb	E	E	√		E	E	E				
Gelmers ²⁶	Finger-to-thumb	I		√		E			√			
Decety et al. ⁹²	Writing	√	√	√		E						√
PET												
Stephan et al. ³¹	Joystick mvts.		√	√	√	E			√	√		E
Jueptner et al. ³⁶	Joystick mvts.											√
Seitz et al. ³⁷	Writing		E	E	I		E	E	√	√		E
Deiber et al. ²⁸	Cued finger mvts.	I	E	√	√						√	E
	Free finger mvts.	I	√	√	√		E				√	E
fMRI												
Rao et al. ⁹³	Finger mvts.		√	√			E	E				
Sanes et al. ⁹⁴	Outlining a square		√	√	√		E	E	√			
Tyszka et al. ²⁹	Finger-to-thumb			√	√							
Leonardo et al. ⁹	Finger-to-thumb		√			√			√			
Sabbah et al. ⁴²	Finger mvts.			E		√						
Roth et al. ³⁵	Finger-to-thumb		√	√			√	E				
Porro et al. ⁴¹	Finger-to-thumb		E				√	E				
Luft et al. ³²	Finger-to-thumb		√				√	√			√	E
Lotze et al. ⁴³	Clenching of hand		√	√	√		√	E			√	
EEG												
Naito & Matsumara ⁹⁵	Finger mvts.			√								
Beisteiner et al. ³⁸	Joystick mvts.					√						
Cunnington et al. ⁹⁶	Tapping board			√								
Green et al. ⁹⁷	Finger mvts.		I	I			E					
MEG												
Lang et al. ³⁹	Finger mvts.						√					
Schnitzler et al. ⁴⁰	Finger mvts.						√					

Abbreviations:

mvts = movements; √ = activated during both physically executed and imagined mvts

E = activated during physically executed mvts only; **I** = activated during imagined mvts only

BG = basal ganglia

Ce = cerebellum

Cg = cingulate cortex

M1 = primary motor cortex

pF = prefrontal cortex

Pi = inferior parietal cortex

Ps = superior parietal cortex

pM = premotor cortex

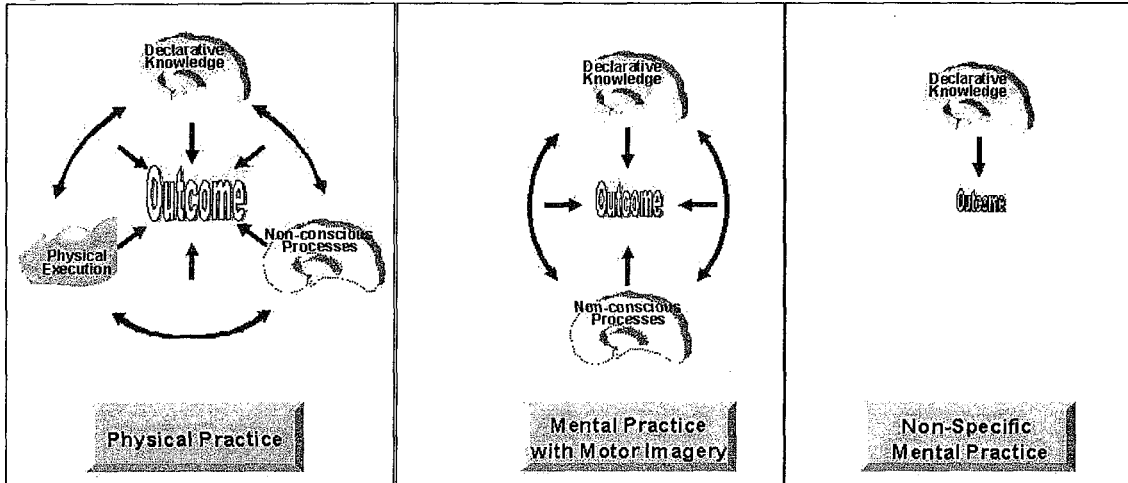
S1 = primary somatosensory cortex

SM = sensorimotor cortex

sma = supplementary motor area

Note that for technical reasons or because of a priori hypotheses, most experiments cited in this table did not cover the whole brain

Fig. 1. Model representing the various processes involved in three different types of practice.



Outcome :

- improvement in performance
- changes in cerebral organization
- increases in arousal and motivation

CHAPITRE 3

ARTICLE 2:

VALIDATION OF A SEQUENTIAL LEARNING TASK FOR THE LOWER LIMB

Résumé

Cette étude s'intéresse à l'effet de la pratique d'une nouvelle tâche motrice basée sur le protocole du « Serial Reaction Time » impliquant l'apprentissage d'une séquence de flexions plantaires et dorsales de la cheville. L'objectif principal de cette expérience est de tester si différents groupes de sujets peuvent apprendre la tâche de séquence du pied lors d'un entraînement physique. Ainsi, dix sujets jeunes, dix sujets plus âgés, et quatre patients ayant subi un dommage cérébral à la suite d'un accident cérébro-vasculaire, ont pratiqué une séquence de 6 mouvements de flexions plantaires et dorsales de la cheville pendant 10 sessions d'entraînement. Chaque session comprend 5 blocs constitués de 6 répétitions consécutives de la séquence. Les sujets devaient apprendre à répondre le plus rapidement et le plus efficacement que possible à une série de stimuli auditifs correspondant aux deux positions du pied. Une séquence non-pratiquée de difficulté équivalente est exécutée aux sessions 1, 5 et 10, afin de mesurer la spécificité de l'apprentissage. Les résultats indiquent que l'apprentissage démontré par les sujets jeunes ou plus âgés est similaire mais que les sujets jeunes sont en moyenne plus rapides. Les données obtenues avec la séquence non-pratiquée montrent cependant qu'une partie de l'apprentissage est transférable à une autre séquence possédant la même structure abstraite. Les résultats obtenus avec les patients démontrent qu'il leur est possible d'apprendre cette tâche, même avec un déficit moteur affectant le membre inférieur. Les deux patients qui n'ont pas démontré d'amélioration significative de leur performance avaient des lésions cérébrales affectant la production et la compréhension du langage, suggérant que l'intégrité de ces régions associatives du cortex est peut-être essentielle à l'apprentissage de la tâche de séquence de mouvements du pied.

Running title: Learning of a new foot-sequence task

Validation of a new sequential learning task for the lower limb

Philip L. Jackson^{ψ,*}, Martin F. Lafleur^{ψ,*}, Francine Malouin^{†,*}, Carol L. Richards^{†,*},
and Julien Doyon^{‡,*}

^ψ Department of Psychology, [†] Department of Rehabilitation, Laval University

^{*} Rehabilitation and Social Integration Research Centre (CIRRS), Quebec, Canada

[‡] Department of Psychology, University of Montreal, Montreal, Canada

Inquiries addressed to:

Julien Doyon, Ph.D.

Psychology Department

University of Montreal

C.P. 6128, Succ. Centre-ville

Montreal (Quebec)

Canada, H3C 3J7

Phone: 1-514-343-6502

Fax: 1-514-343-5787

E-mail: julien.doyon@umontreal.ca

Abstract

This study investigated the learning of a new motor task involving single-joint sequential movements of the foot. The task, which is based on the Serial Reaction Time paradigm, offers the advantage of measuring the performance of lower limb movements while reducing overall body and head movements, thus making it an interesting task for brain mapping experiments. One specific objective of this experiment was to test whether different groups of subjects, i.e., young healthy, older healthy and patients with a hemiplegia following a stroke, could learn this new Foot Sequence Task (FST) through physical practice. Subjects practiced an explicitly taught 6-element sequence of dorsi- and plantarflexions of the ankle during 10 training sessions. Each session comprised a total of 5 blocks of 6 consecutive sequences during which subjects had to respond, as quickly as possible while avoiding errors, to an auditory cue corresponding to a specific foot position. On Sessions 1, 5 and 10, the performance of subjects was also assessed using another 6-element sequence to test the specificity of the learning. Comparison of the mean response time of young and older subjects showed that both groups were able to acquire the practiced sequence, although the younger subjects were on average faster to respond. The data obtained with the non-practiced sequence suggested that a good part of the learning could be generalized from one sequence to another. The same abstract structure shared by the two sequences could explain this generalization. Results also showed that some patients were able to learn the task, despite motor impairment of the lower limb. Two patients with lesions to the left hemisphere, and showing mild to moderate productive and receptive aphasia did not learn the task, suggesting that learning of this task could depend on the integrity of high order associative cortex.

Introduction

Motor skill learning is typically assessed via a variety of tasks that measure changes in response time, accuracy or the dynamics of the movements. Sequence learning, based on the Serial Reaction Time Paradigm (Nissen & Bullemer 1987), is one of the most widely used tasks as it can be designed to measure either implicit or explicit skill acquisition, or both. Although several different tasks derived from this paradigm have been used to study skill learning of the upper limbs, very few were designed to examine performance changes of the lower extremities. We developed a new skill-learning task that measures the learning of single-joint sequential foot movements (plantarflexion and dorsiflexion). This Foot Sequence Task (FST), which does not involve movements from the rest of the body, was specifically designed to be used in behavioural experiments as well as subsequent functional brain activation studies. The fact that only single-joint movements are necessary to execute the task also reduces the number of variables (degrees of freedom) that have to be taken into account to explain how the task is learned. Moreover, the task's simplicity makes it easier to use by people with motor deficits than a task involving whole limbs and multiple joint movements. The task is also easy to imagine and can thus be practiced either physically, mentally or both .

The aim of the present experiment was thus to test the efficiency of the FST at measuring changes in performance (lower limb response time) in different groups of subjects: young healthy subjects, older healthy subjects, as well as patients with a hemiparesis following a stroke. It was hypothesized that all groups of subjects would improve with practice but that young subjects would be faster than older subjects, which would be faster than patients who had a stroke.

Method

Subjects

Ten young healthy subjects aged between 19 and 28 years (Group YC; $X = 22.8$ years ; $SD = 3.16$), 9 older normal subjects aged between 45 and 53 years (Group OC; $X = 50$ years; $SD = 2.45$), and 4 patients with hemiplegia caused by a stroke (Group HP) were recruited. All subjects showed evidence of right hand and right foot dominance. Exclusion criteria for this study included other major medical problems (e.g., heart condition, cancer), neurological (e.g., Parkinson's disease) and psychological disorders (e.g., depression), uncorrected hearing impairments, as well as musculoskeletal disorders of the lower limbs.

Patient 1

He was a 38 year-old right-handed man who suffered a stroke 4 months before testing began. Magnetic resonance imaging performed on the day of his stroke displayed a 1 to 2 cm haemorrhage-related lesion extending from the left cerebral peduncle to the left pulvinar of the thalamus. No arterial-vein malformation was observed. He initially presented with an hemiparesis of his right side, and his upper limb was generally more affected than his lower limb. The patient had hypoesthesia on the right side of the body that gradually diminished over the following weeks but was not completely resolved during the course of this experiment. The movements with his right lower limb were reduced in speed although he reached stage 7 on the foot scale of the Chedoke-McMaster Stroke Assessment Impairment Inventory (see Appendix 3). He had an education equivalent of 15 years.

Patient 2

She was a 67 year old right-handed woman who was hospitalised for a left middle cerebral vascular accident (CVA) 10 months before the experiment. She initially presented with a complete right hemiparesis and right hemianopsia. Her language

production was severely compromised and characterized by perseverations but comprehension of simple commands was adequate. At the time of testing, she still presented moderate mixed aphasia. She used a cane to move about and rated at stage 6 on the foot scale of the Chedoke-McMaster Stroke Assessment Impairment Inventory.

Patient 3

This 45 years old right-handed woman was admitted 16 months earlier for a left CVA. At the time of testing, she still had a moderate production aphasia. Her walking speed and endurance were slightly reduced. She was rated at stage 6 on the foot scale of the Chedoke-McMaster Stroke Assessment Impairment Inventory. Her education level was High School.

Patient 4

He was a 64 year old right-handed man who had a right CVA four months before the first testing session. CT scan images revealed a small lesion (1 cm) on the posterior region of the lenticularis nucleus. Upon admission to the rehabilitation centre, 6 weeks post-stroke, he displayed a left hemiparesis and significant balance problems. His score on the Fugl-Meyer scale for the lower limb was 28/34. At the time of testing, his walking endurance was still considerably reduced and he walked with a cane. He scored at stage 4 on the foot scale of the Chedoke-McMaster Stroke Assessment Impairment Inventory. An occupational therapist still noted, one month prior to testing, a slight attention/concentration problem, and significantly reduced reaction times. No language problems were apparent during conversation. He had an education equivalent to the eighth grade.

Materials

Foot-Sequence Task (FST): apparatus.

The task was performed in an apparatus that consisted of a wooden pedal (13 x 35 cm), mounted in a wooden frame (45 cm long, 29 cm wide and 60 cm high, [see Appendix 1: Lafleur, Jackson, Richards, Malouin, Evans, & Doyon, 2002]). The height and length of the pedal could be adjusted to standardise the foot position of subjects relative to the ankle's axis of rotation. Two straps attached to the pedal were used to secure the subject's foot, and the left leg was slightly raised and supported by pillows. Subjects performed the task in a supine position on a wooden bed covered with a foam mattress. A potentiometer, fixed on the pedal axis and connected to a relay box, could be adjusted with three tuning knobs to detect three different pedal angles (positions). The relay box was linked to a portable computer (Hewitt Rand) that generated auditory stimuli through a speaker (Radio Shack Model 21-549A) and registered subjects' response time (ms) and accuracy.

Procedure

Subjects participated in ten experimental sessions. In the first session, they read and signed a consent form after the procedure had been fully explained. Both manual (Crovitx & Zener, 1962) and foot dominance were assessed with questionnaires. Participants were set up in the apparatus with their left foot attached to the pedal. Three foot positions were determined (maximum dorsiflexion [up], middle position, maximum plantarflexion [down]) and the relay box was adjusted to recognise these positions. The task was then explained to the subjects. When the middle position was triggered, a sound (either high or low pitched) was heard until the subjects reached the corresponding position (success) or another position (error). The middle position had to be triggered again for the next sound to be heard. Subjects were asked to execute a dorsiflexion (up) in response to a high pitched sound and a plantarflexion (down) in response to a low pitched sound, and to move as quickly as possible while avoiding making errors. A trial thus either consisted of a movement starting from the middle position and ending at a maximum position, or of a movement starting at a maximum position and reaching the middle.

All subjects were first given 12 trials to familiarize them with the apparatus. One of two different sequences of six dorsi- and plantarflexions of the ankle was then taught to each subject. Half the subjects in each group were required to practice Sequence A (up-down-down-up-down-up) while the other half was asked to practice Sequence B (down-up-up-down-up-down). Note that Sequence B consisted of the inverse of Sequence A.

Foot sequence task training

During each of the ten sessions, subjects were administered five blocks of their assigned sequence (either A or B). Each block comprised 72 trials (or six sequences plus each movement towards the middle position) and were separated by one-minute pauses. On sessions 1, 5 and 10, subjects also had to complete five blocks of the opposite (non-assigned) sequence. Before the first block of each sequence, they were taught explicitly the order of movements and had to reproduce the sequence three times in a row without error before training began. They were then asked to complete each block of trials as quickly as possible, while making as few errors as possible. The response time for each trial as well as the number of errors was recorded automatically. The number of errors served as a control to verify that the task was done correctly and that accuracy was not neglected in favour of speed.

Data Analysis

In order to determine whether the task was learned with practice, the mean response time to complete one block of trials, for each session and for both groups (YC, OC) was submitted to an ANOVA with repeated measures. The critical alpha level was set at $p = 0.05$. Performance of Patients 1 to 4 will be described separately, and compared to the performance of the OC group.

Results

Sequence effect

First, a 2 X 10 (Sequence X Session) analysis of variance (ANOVA) with repeated measures was performed to determine if learning differed between Sequence A and Sequence B across sessions of practice. Results revealed no significant main effect of Sequence ($F(1,17) < 1$) nor a significant Sequence X Session interaction ($F(9,153) = 1.20, p > 0.05$) indicating that the performance of healthy subjects on the two distinct sequences did not differ across sessions. However, a significant effect of Session was observed ($F(9,153) = 35.94, p < 0.0001$) indicating that response time decreased across sessions independently of which sequence was presented. From this point on, data from Sequence A and Sequence B were pooled because the sequences were considered of equivalent difficulty.

Age effect

To verify if performance and learning differed between the two healthy groups, another 2 X 10 (Group X Session) ANOVA with repeated measures was performed (see Figure 1). Results showed significant main effects of Group ($F(1,17) = 21.14, p < 0.001$) and Session ($F(9,153) = 34.96, p < 0.0001$) but the Group X Session interaction did not reach statistical significance ($F(9,153) = 1.13, p > 0.05$). This pattern of results indicates that group YC was generally faster than group OC and that practice improved the performance of both groups similarly.

Insert Figure 1 about here

Specificity of the learning

The specificity of the learning was assessed by comparing performance of the practiced sequence with that of the non-practiced sequence (variable Practice) in sessions 1, 5 and 10 (see Figure 2). Since both groups showed similar learning curves, this variable was not taken into account in the analysis. A 2 X 3 (Practice X Session) ANOVA with repeated measures revealed a significant main effect of Session ($F(2,36) = 63.079, p < 0.0001$) but the main effect of Practice did not reach statistical significance ($F(1,18) < 1, p > 0.05$) which suggests that there was some generalization of learning from the practiced sequence to the non-practiced one. The Practice X Session interaction did not reach statistical significance either ($F(2,36) = 1.30, p > 0.05$)

Insert Figure 2 about here

To support the generalization hypothesis, another 2 X 3 (Practice X Session) ANOVA was performed but this time the variable Session corresponded to Sessions 1, 5 and 10 for the non-practiced sequence and Sessions 1, 2 and 3 for the practiced sequence (see Figure 3). This allowed comparison of the learning achieved with both sequences across an equivalent number of practice sessions (i.e., 3 sessions). The findings showed significant main effects of Practice ($F(1,18) = 9.24, p < 0.05$) and Session ($F(2,36) = 41.76, p < 0.0001$). The Practice X Session interaction was not statistically significant ($F(2,36) < 1, p > 0.05$). The main effect of Practice indicated that for an equivalent number of practice sessions, the non-practiced sequence was executed on average faster than the practiced one, which strongly suggests that the performance of the non-practiced sequence was improved by training on the practiced sequence.

Insert Figure 3 about here

Patient 1

The initial performance of Patient 1 is similar to that of Group OC (687 ms compared to 639 on average for the OC group). Visual inspection of the data showed that Patient 1 learned the foot sequence task across the ten sessions (see Figure 4). Performance reached an average of 511 ms on the last session, which corresponds to a 26% improvement in performance compared to the baseline obtained in Session 1.

Insert Figure 4 about here

Interestingly, inspection of the standard deviations across the ten sessions showed that even when response times were fairly stable, the performance showed progressively better consistency (smaller standard deviations) up to the last training sessions , supporting further the argument that learning took place (see Figure 5).

Insert Figure 5 about here

Patient 2

Patient 2 did not display any learning of the foot sequence task when the response times were observed (see Figure 4). In fact, performance deteriorated by 19% at the end of training compared to baseline. The maximum increase in performance reached by this patient was on Session 4 (11%). Examination of the standard deviations show only a slight improvement in performance constancy (see Figure 5).

Patient 3

Similarly to Patient 2, Patient 3 did not show any systematic decrease of response time suggesting that the task was not learned (see Figure 4). The fastest performance reached was on the last session in which the patient took, on average, 683 ms to respond to the stimulus. This corresponds to a 2% improvement compared with the baseline of 699 ms. Some learning of the task might have occurred, however, as suggested by the slight decrease in the standard deviations (see Figure 5).

Patient 4

This patient clearly learned the foot sequence task (see Figure 4). Even if initial performance was very slow, it improved gradually to reach a 38% decrease in response time by the last session. The dramatic decrease in the standard deviations also shows that the patient was progressively more consistent in his performance (see Figure 5).

Discussion

The purpose of this experiment was to verify if the new foot-sequence task could be learned by healthy subjects of different age groups, as well as by patients who showed residual motor deficits following a stroke. The results demonstrated that even if older subjects are slower in general, they showed similar improvement to young normal

subjects. Therefore, age seems to affect performance level but not the learning of this type of task, which is consistent with results from other experiments with serial reaction times (e.g., Howard & Howard, 1992). Also, it was found that the two sequences chosen (A and B), which comprised an equal number of elements and an equal number of flexion and extension movements, were of equivalent difficulty and equally well learned. Similar findings have been obtained with upper limb movements, for example with finger sequences (Karni et al., 1995).

Results on the specificity aspect of the learning, however, were contrary to what was expected. Analyses of the practiced and non-practiced conditions showed that part of the learning from one sequence generalized to the other sequence. In fact, performance with the non-practiced sequence, which was practiced only on Sessions 1, 5 and 10, was similar to that of the practiced sequence that was practiced over the ten training sessions. It is possible that the exposure to any sequence contributes to the learning of the general aspects of the task and that no specific learning is achieved. Another possible explanation for this finding comes from recent evidence showing that in explicit conditions, the learning of the abstract structure of a sequence can be generalized to an isomorphic sequence (Dominey, Lelekov, Ventre-Dominey, & Jeannerod, 1998). The abstract structure is defined by the relationship between repeating sequence elements. For example, the sequences ABCABC and DEFDEF share the same abstract structure or format that follows the rule 123123 (Dominey et al., 1998). Other experiments which have used non-isomorphic sequences have shown an increase for the practiced sequence with practice but not for the non-practiced sequence (e.g., Karni et al., 1995).

To clarify this point, future experiments could 1) administer less blocks of trials on each session to lessen the general learning effect, 2) add a random condition to control for the specificity of the learning as was done by previous researchers (Nissen & Bullemer, 1987; Doyon et al., 1997) and, 3) use non-isomorphic sequences with an equal number of flexion and extension movements.

Six was chosen as a reasonable number of movements to ask patients to learn explicitly. However, because it is impossible with six elements to generate two non-isomorphic sequences with equal numbers of flexion and extension movements, the use of a random condition as well as the lessening of the number of learning blocks per session are retained as justified modifications to the foot sequence task.

Regarding the performance of hemiplegic patients, analysis of the results suggested that this task can be learned by some patients, even when some motor deficits are present. Moreover, the ability to learn this task seemed independent of the functional level of the patient. As described in the Subjects section, the lesions differed greatly from one patient to another. One major difference between the patients who showed significant learning of the task (Patients 1 and 4) and the others (Patients 2 and 3) is the absence of language dysfunction. Patients 2 and 3 both presented some language problems characterized mainly by production difficulties (i.e., Broca's type of aphasia) which suggest that the damage extends to the language areas of the dominant frontal lobe (probably left in both cases). It is possible that a cerebral area, or system, involved in language production, or close to the cortical language areas was damaged in patients 2 and 3 and thus impaired learning of the foot sequence task. One region often cited as being involved in sequential learning is prefrontal cortex (e.g., Gomez Beldarrain, Gafman, Ruiz De Velasco, Pascual-Leone, & Garcia-Monco, 2002). Some studies have also suggested that specific areas in this region could be important in the manipulation of spatial information necessary to learn a sequential task (Robertson, Tormos, Maeda, & Pascual-Leone, 2001). A detailed analysis of the extent of the lesions is necessary in order to explore further this line of evidence and unfortunately we did not have access to the original scan data.

Finally, it is interesting to note that measures other than response time can be used to assess learning of this task. In fact, decreasing variability across blocks of trials (or sessions) shows that performance becomes more stable, suggesting that some patients

learn to control their foot better. Thus practice of the task can lead to a smoother performance, which might not be faster but nevertheless implies some learning processes. Indeed, simple foot control is usually not a problem for normal subjects but this variable likely represents a significant improvement for patients with a motor deficit.

In conclusion, the foot sequence task offers useful and precise measures of performance that can be used to assess motor skill acquisition with the lower-limb in different populations. Further experiments aimed at investigating whether this task can be practiced mentally as well as physically, will determine its use in future rehabilitation studies.

References

- Crovitz, H.F., & Zener, K. (1962). A group-test for assessing hand-and-eye dominance. *American Journal of Psychology*, *73*, 271-276.
- Dominey, P.F., Lelekov, T., Ventre-Dominey, J., & Jeannerod, M. (1998). Dissociable processes for learning the surface structure and abstract structure of sensorimotor sequences. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *10*, 734-751.
- Doyon, J. (1997). Skill learning. *International Review in Neurobiology*, *41*, 273-294.
- Doyon, J., Gaudreau, D., Laforce, R.J., Castonguay, M., Bedard, P.J., Bedard, F., & Bouchard, J.P. (1997). Role of the striatum, cerebellum, and frontal lobes in the learning of a visuomotor sequence. *Brain & Cognition*, *34*, 218-245.
- Doyon, J., Owen, A.M., Petrides, M., Sziklas, V., & Evans, A.C. (1996). Functional anatomy of visuomotor skill learning examined with positron emission tomography. *European Journal of Neuroscience*, *8*, 637-648.
- Gomez Beldarrain, M., Gafman, J., Ruiz De Velasco, I., Pascual-Leone, A., & Garcia-Monco, C. (2002). Prefrontal lesions impair the implicit and explicit learning of sequences on visuomotor tasks. *Experimental Brain Research*, *142*, 529-538.
- Howard, D.V., Howard, J.H. (1992). Adult age differences in the rate of learning serial patterns: evidence from direct and indirect tests. *Psychology and Aging*, *7*, 232-241.
- Karni, A., Meyer, G., Jezzard, P., Adams, M., Turner, R., & Ungerleider, L.G. (1995). Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during skill learning. *Nature*, *377*, 155-158.
- Lafleur, M.F., Jackson, P.L., Richards, C., Maloian, F., Evans, A., & Doyon, J. (2002). Motor learning produces parallel dynamic functional changes during the execution and imagination of sequential foot movements. *NeuroImage*, *16*, 142-157.
- Morrow, D., Yesavage, J., Leirer, V., & Tinklenberg, J. (1993). Influence of aging and practice on piloting tasks. *Experimental Aging Research*, *19*, 53-70.

Nissen, M.J., & Bullemer, P. (1987). Attentional requirements of learning: evidence from performance measures. *Cognitive Psychology*, *19*, 1-32.

Robertson, E.M., Tormos, J.M., Maeda, F., & Pascual-Leone, A. (2001). The role of the dorsolateral prefrontal cortex during sequence learning is specific for spatial information. *Cerebral Cortex*, *11*, 628-635.

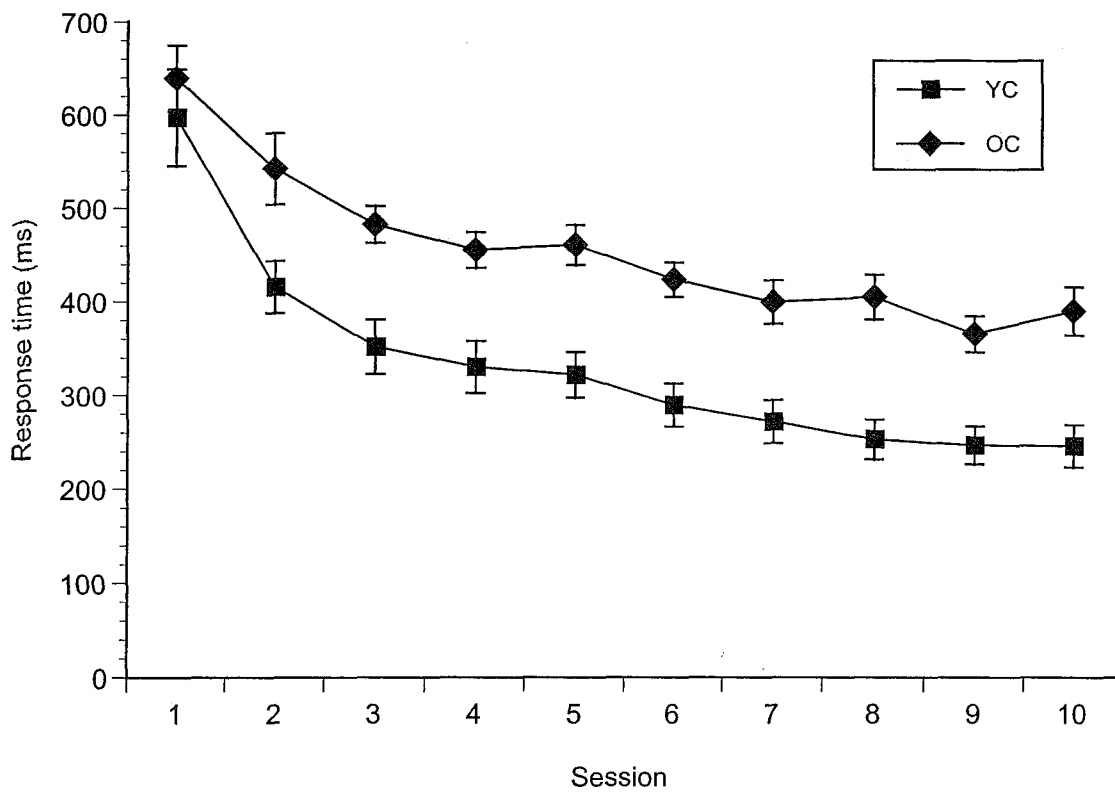


Figure 1: Mean response time in milliseconds (ms) for the Young Control (YC) and the Older Control (OC) groups across the 10 training sessions. Error bars show standard error.

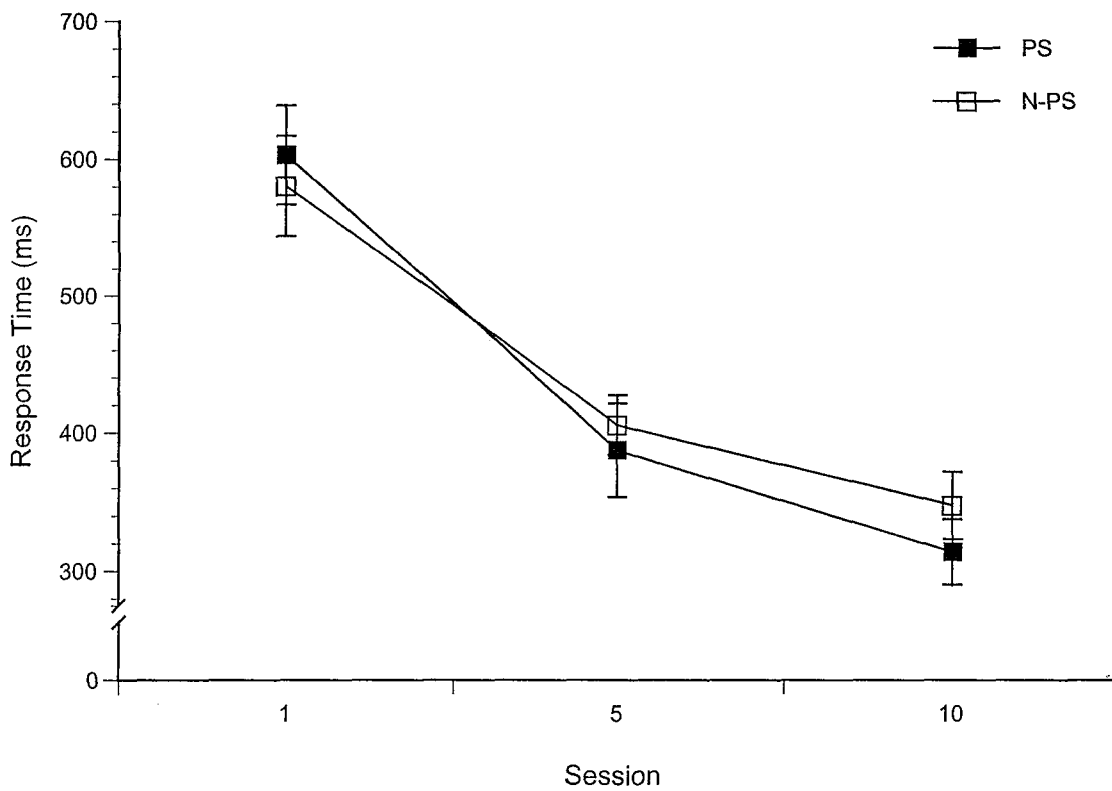


Figure 2: Comparison of the mean response time in milliseconds (ms) for the Practiced (PS) and Non-Practiced (N-PS) sequence in Sessions 1, 5 and 10. Response times for the Young and Older groups were merged. Error bars show standard error.

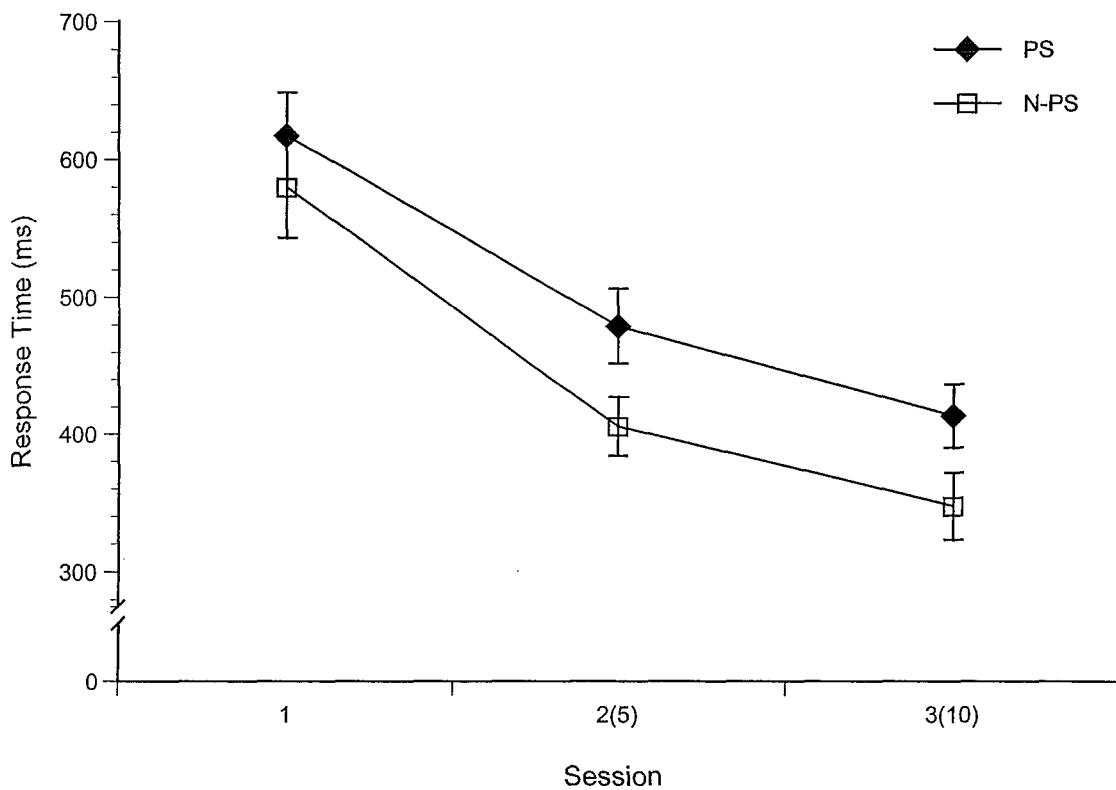


Figure 3: Comparison of the mean response time in milliseconds (ms) for the first three Sessions of the Practiced (corresponding to Sessions 1, 2, 3) and the Non-Practiced sequence (Sessions 1, 5, 10). Response times for the Young and Older groups were merged. Error bars show standard error.

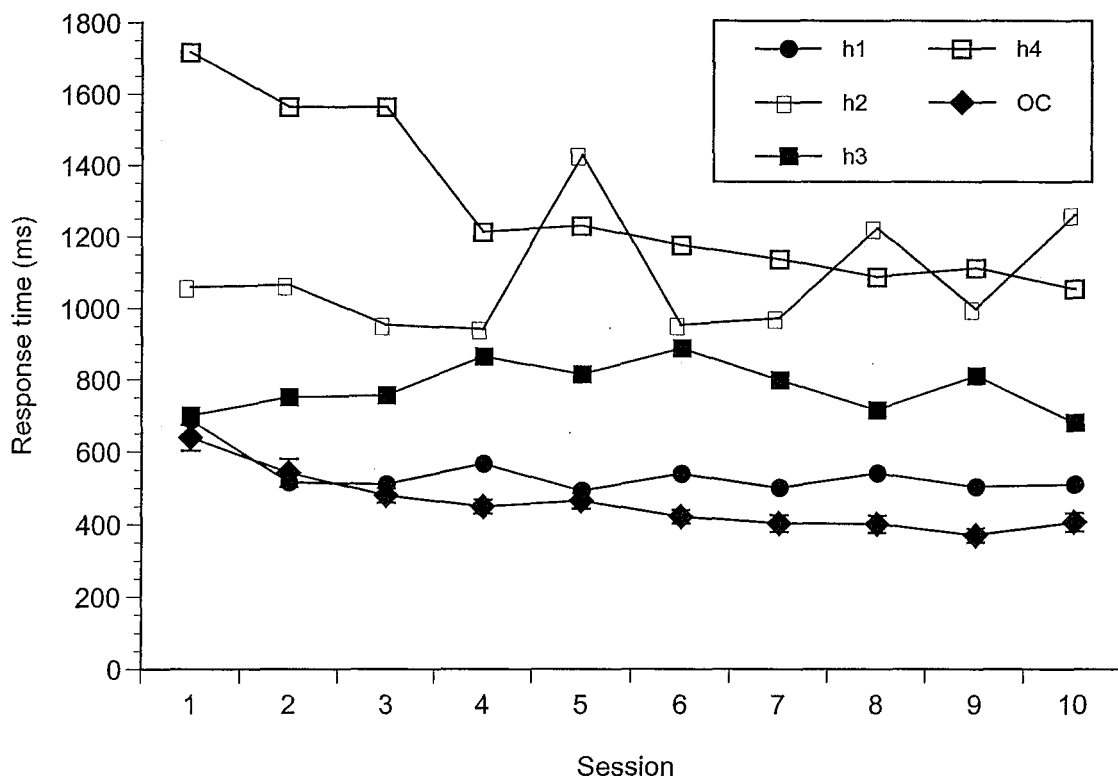


Figure 4: Average response time of the four patients with a hemiparesis and the Older Control group (OC) groups across the 10 learning sessions.

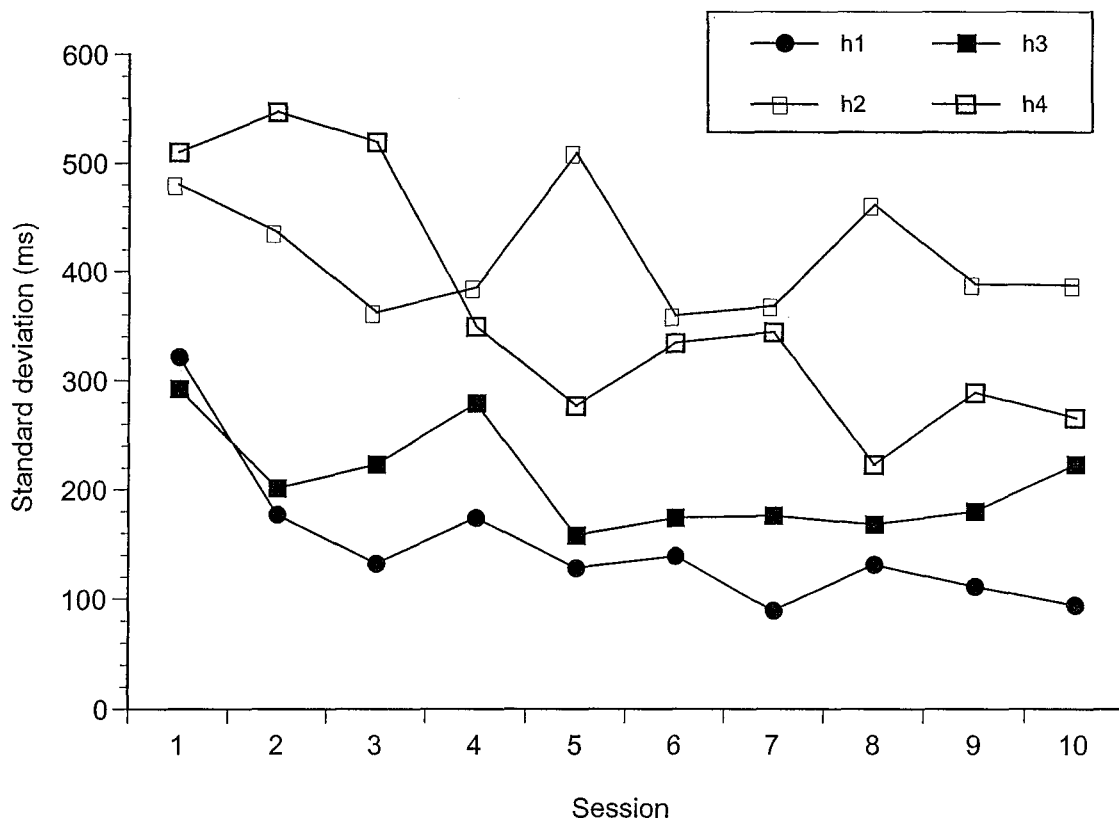


Figure 5: Standard deviations of the four patients with a hemiparesis for each of the 10 training sessions.

CHAPITRE 4

ARTICLE 3:

LEARNING AND RETENTION OF A FOOT-SEQUENCE TASK WITH MENTAL
PRACTICE: THE IMPORTANCE OF MOTOR IMAGERY

Résumé

La présente étude examine l'effet de la pratique mentale de mouvements sur l'apprentissage d'une habileté motrice. Plus spécifiquement, elle a pour but de déterminer si l'imagerie motrice est une composante essentielle à l'acquisition et à la rétention d'une séquence de mouvements du pied par pratique mentale. Trente sujets sains ont été assignés aléatoirement à deux groupes expérimentaux, pratique mentale par imagerie motrice (IM) ou pratique mentale par répétition verbale (RV), et un groupe contrôle, aucune pratique mentale (CT). L'apprentissage a été évalué sur une période de six semaines et la performance des sujets à la tâche a été mesurée chaque semaine sous trois conditions: une séquence connue et pratiquée, une séquence connue mais non-pratiquée et une condition où les éléments sont présentés de façon aléatoire. La rétention des acquis a été évaluée à l'aide des mêmes conditions expérimentales après une période moyenne de 6 mois. Les résultats démontrent que les sujets des groupes IM et RV se sont améliorés significativement à la séquence pratiquée en comparaison à la condition aléatoire. L'apprentissage du groupe IM était aussi plus spécifique à la séquence pratiquée qu'à celle non-pratiquée. Les données obtenues après un délai prolongé montrent que seuls les sujets du groupe IM maintiennent un niveau de performance supérieur à celui obtenu au début de la période d'apprentissage. Ces résultats supportent l'idée que l'imagerie motrice est une composante essentielle à la pratique mentale de mouvements si l'on veut maximiser la spécificité et la rétention des acquis. Un modèle de la pratique mentale basé sur la dichotomie entre l'apprentissage déclaratif et l'apprentissage procédural est discuté afin d'expliquer ces résultats.

Learning and Retention of a Foot-Sequence Task with Mental Practice:
the Importance of Motor Imagery

Philip L. Jackson^{ψ*}, Martin F. Lafleur^{ψ*}, Francine Malouin^{†*}, Carol L. Richards^{†*},
and Julien Doyon¹

^ψDepartment of Psychology, [†] Department of Rehabilitation, Laval University

* Rehabilitation Institute of Quebec, Quebec, Canada

¹Department of Psychology, University of Montreal, Montreal, Canada

Inquiries addressed to:

Julien Doyon, Ph.D.

Psychology Department

University of Montreal

C.P. 6128, Succ. Centre-ville

Montreal (Quebec)

Canada, H3C 3J7

Phone: 1-514-343-6502

Fax: 1-514-343-5787

E-mail: julien.doyon@umontreal.ca

Abstract

We investigated the effect of mental training on the acquisition and retention of a sequential foot-movement task. Thirty healthy subjects were assigned to three groups: mental practice with motor imagery, mental practice with verbal rehearsal, and no mental practice. Learning was assessed by measuring response times of subjects weekly over a six-week period under three conditions: a practiced sequence, a non-practiced sequence, and a random condition. Retention was measured after an interval of six months on average. The results showed that subjects in both the motor imagery and the verbal rehearsal groups improved their performance in the sequence conditions significantly more than in the random condition. Improvement in the motor imagery group was superior for the practiced than for the non-practiced sequence. By contrast, subjects in the control group did not demonstrate any learning of the sequential aspect of the task. Examination of the retention data revealed that only subjects in the motor imagery group retained a level of performance that was significantly superior to that observed at the beginning of the experiment. These results support the notion that motor imagery is an essential component of mental practice as assessed by the specificity in the learning and the retention of the skill that this method yielded. A model of mental practice based on the declarative-procedural dichotomy in the skill learning literature is discussed to help explain these findings.

Introduction

Mental practice (MP) is the symbolic rehearsal of a physical activity in the absence of gross movement (Richardson, 1967a). The use of this training technique is widespread in sport psychology, where it has been shown to improve the performance of different individual athletic skills. Several meta-analyses have been conducted on the effect of MP in skill learning (Corbin, 1972; Driskell, Copper, & Moran, 1994; Feltz & Landers, 1983; Richardson, 1967a; 1967b), and the general consensus is that its effect does not surpass that of physical practice, but that it is often found to be superior to no practice at all. As such, MP represents a potential adjunct to traditional training methods. These studies have also explored some of the variables that can influence the effect of mental practice on the gains in performance. One of the main conclusions drawn from these meta-analyses is that skills which are high in cognitive demands respond better to mental practice during the initial phases of the acquisition process (Driskell, et al., 1994). In light of these encouraging results regarding the potential of MP, numerous attempts at formulating theories to explain the beneficial effects observed with MP have been put forward, but most remain incomplete or difficult to test empirically (see Jackson, Lafleur, Malouin, Richards, & Doyon, 2001, for a brief review of the different theories).

We have recently proposed a model of mental practice from a rehabilitation perspective (Jackson et al., 2001), which uses motor imagery (MI) as the key element of this training method. We suggested that MI allows subjects to tap into the non-conscious (i.e., procedural) aspects involved in learning a skill, hence improving its performance. We further argued that the traditional cognitive-motor dichotomy might not be the most relevant distinction to be drawn, in order to better understand the underlying processes of MP. While the distinction between explicit and implicit processes can easily be defined operationally on the basis of the conscious access to the learned information, the distinction between what constitutes a purely motor and a purely cognitive process is not as easy to draw. This difficulty becomes even more obvious in the domain of motor skill learning, for which sequential tasks have often been the model of choice. Indeed,

numerous experiments have used the serial reaction time (SRT) paradigm (Nissen & Bullemer, 1987) to explore the acquisition of sequential skills. One major confounding factor in most of these studies is the possible overlap between the explicit knowledge and the procedural learning of the sequence that are acquired with practice. According to some theories of MP (e.g., Sackett, 1934), training on the SRT paradigm would initially improve the knowledge of the sequence, because the more "cognitive" aspects of a task appear to be the first to fall under the influence of mental practice.

In a recent study (Shanks & Cameron, 2000), it was found that a group of normal subjects who practiced the SRT mentally, before having acquired full declarative knowledge of the sequence, failed to improve their performance significantly with practice. Yet, other subjects who practiced the sequence physically did improve their response time. The authors argued that MP likely acted only on the declarative knowledge of the sequence, and not at the procedural level. They proposed, however, that physical practice on the other hand, has the ability to tap into both levels of processing. They evoked the transfer-appropriate processing theory, which proposes that the expression of (new) knowledge depends on the means of acquisition. Thus, in their experiment, Shank & Cameron (2000) suggest that MP provided knowledge restricted to a mental imagery skill, which cannot be expressed via the physical execution of the SRT, while physical practice of the task yields improvement in the perceptual-motor skill itself. We hypothesised that, because the subjects in the mental practice group did not have any prior knowledge of the sequence, mental training did not allow access a more comprehensive representation of the sequence of movements required to execute the skill.

According to our model of mental practice (Jackson et al., 2001), MP with MI can induce both declarative and procedural levels of processing, and thereby improve performance on motor sequence learning tasks. To test this hypothesis, it might be best to examine the two levels of processing independently. One way to tap directly and solely into the declarative component of a sequential motor skill is to use verbal rehearsal. Verbal rehearsal can be

described as the explicit repetition of the verbal labels attached to the different elements of a motor sequence through inner-speech (e.g., Hall, Moore, Annett, & Rodgers, 1997). For instance, in the Nissen & Bullemer's paradigm (1987), verbal rehearsal would consist of repeating the sequence of positions (e.g., 1-2-4-3-2-3-4-1-3-2) covertly over and over. This form of mental practice would control for a more purely cognitive and strictly declarative aspect of the task, and may not tap into the motor-related system the same way MI does (Jackson et al., 2001).

The main objective of the present experiment was thus to measure the effect of mental practice on the procedural learning of a sequential motor skill. Other objectives were to determine whether or not motor imagery is an essential component of mental practice, and whether the learning associated with motor imagery practice is specific to the practiced sequence. To do so, we compared the learning and the retention of a sequential motor skill in a group of subjects who practiced using motor imagery, with that of another group of subjects who practiced the sequence with verbal rehearsal and a control group which did not practice mentally. Three conditions were used: a sequence of foot movements which was practiced, an equivalent sequence which was not practice and random movements. We hypothesised that the group who practiced the sequence using motor imagery would display the most improvement on the task, and particularly for the practiced sequence. The group who practiced using verbal rehearsal and the group who was not submitted to any form of mental practice were expected to improve only minimally on the task, and equally for the three conditions.

Method

Subjects

Thirty healthy right-handed and right-footed subjects ranging in age between 22 and 37 years ($X = 27.4 \pm 4.1$ years) were recruited. These participants were quasi-randomly assigned to one of three groups: mental practice with motor imagery [MI, $n = 10$], practice

with verbal rehearsal [VR, n = 10], and a no mental practice control group [CT, n = 10]. All groups were equivalent in terms of age, years of education and gender ratio according to analyses of variance and chi-square analysis performed on these variables. The exclusion criteria included major medical problems, neurological disorders, psychological illness, uncorrected hearing impairments, as well as musculoskeletal disorders of the lower limbs. Subjects gave their written consent and were financially compensated for their regular visits to the laboratory. The study had been approved by the Research Center's ethics committee.

Material

Imaginary Distance Index (IDI)

In this screening task, subjects were asked to imagine walking at a regular pace in a familiar setting using the first-person perspective, and then to judge the distance travelled on each trial. They were instructed to walk “mentally” until the experimenter told them to stop. Unknown to the subjects, each trial was terminated after varying intervals of 15, 25, or 35 seconds. Administration of these intervals was counterbalanced such that the subjects were not able to predict when to stop walking. Each interval was presented twice (see Malouin et al., 1997; Malouin et al., submitted).

Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire (KVIQ)

This questionnaire is a modified version of the Movement Imagery Questionnaire (Hall & Pongrac, 1983). This test was chosen because it is adapted for older subjects and patients with locomotor deficits. It consists of 10 questions in which subjects are first required to execute a number of purposive movements, immediately followed by the motor imagery of the same movements using a first-person perspective (i.e., as if they were seeing and feeling themselves perform the movements from within). The subjects then rate their capacity to evoke mental images of the action on a five-point scale (1 = high imagery; 5 = low imagery). Each question is presented twice and subjects are first asked to rate the

vividness (visual quality) of the image, whereas the second rating corresponds to the intensity at which they could feel the movement during MI. The results thus provide a score for a Visual subscale, a Kinesthetic subscale, and a total score (ranging from 20 to 100). The lower the score, the better the subjects' rating of their imagery ability.

Foot-Sequence Task (FST)

The task was performed in an apparatus that consisted of a wooden pedal (13 x 35 cm), mounted in a wooden frame (45 cm long, 29 cm wide and 60 cm high [see Appendix 1; and Lafleur, Jackson, Richards, Malouin, Evan, & Doyon, 2002]). The height and length of the pedal could be adjusted to standardize the foot position of subjects relative to the ankle's axis of rotation, and the leg was slightly raised and supported by pillows. The foot was secured by two straps of Velcro attached to the pedal. Subjects performed the task in a supine position on a wooden bed covered with a foam mattress. A potentiometer, fixed on the pedal axis and connected to a relay box, could be adjusted with three tuning knobs to detect three different pedal angles (positions). The relay box was linked to a portable computer that generated auditory stimuli through an external speaker, and registered subjects' response time (ms) and number of errors.

Electromyography

A portable two-way electromyograph (Pathway MR-20; The Protheus Group) recorded surface EMG activity during the different experimental conditions over two leg muscles: the *tibialis anterior* and the *soleus*. This measure served only as a feedback to the subjects to verify that no muscle contraction occurred during the imagined conditions.

Procedure

The experimental design comprised a total of seven experimental sessions. Session 1 consisted of the pre-training (baseline), Sessions 2 to 6 corresponded to weekly evaluations of the subjects' improvement in performance, while Session 7 was conducted

several months after Session 6 to assess the retention of the skill (see Figure 1). Evaluation of the subjects' appreciation of their motor imagery ability was performed at the beginning (baseline) and at the end of training (Session 6). Between each sessions (1 through 6), subjects in the MI and VR groups practiced mentally a 6-element sequence of foot movements or foot positions (see Mental Training section).

Insert Figure 1 about here

Testing Session 1: Baseline

After the procedure had been fully described to the subjects, the concept of motor imagery was explained, and participants completed the IDI as an introduction to the concept of motor imagery. Due to time constraints, the KVIQ was handed to them to be completed at home.

Physical Execution of the FST. Participants were set up in the apparatus with their left foot attached to the pedal. Note that the left foot was used because performance with this limb was expected to offer more room for improvement than with the right lower limb. Three foot positions were determined (maximum dorsiflexion [up], middle position, maximum plantarflexion [down]) and the relay box was adjusted to recognize these positions. Subjects were requested to execute a dorsiflexion in response to a high pitched sound, and a plantarflexion to a low pitched sound, and to move as quickly as possible, making as few errors as possible. They were also asked to move their foot back to the middle position after each trial to trigger the next auditory stimulus, which remained on until the target position was reached. A trial was thus defined as a movement starting from the middle position and ending at either extreme positions, or as a movement starting at an extreme position and reaching the middle position.

Each subject was given 24 practice trials to become familiarized with the task. They then completed three different conditions: Sequence A, Sequence B, and Random. The order of presentation of the sequences was counterbalanced: half the subjects of each group began with Sequence A, while the other half started with Sequence B. The Random condition was always administered second. These three conditions were administered to assess different level of learning specificity. While improvement of performance in the random condition implies that some general ability to use the apparatus is learned, improvement in a practiced sequence condition implies learning of the sequential skill.

Sequence A corresponded to the following sequence of six foot positions: "up-down-down-up-down-up", while Sequence B consisted of the reverse order: "down-up-up-down-up-down". These sequences were found to be equivalently difficult in previous pilot experiments (data not shown here). Four blocks were performed with one of the sequences, followed by two blocks of the Random condition, and then four blocks of the other sequence. Each block comprised 72 trials (i.e., 6 sequences of 6 elements plus 36 movements towards the middle position), and were separated by one-minute pauses. Before training with the sequence began, subjects were taught explicitly the series of movements and had to reproduce it *errorless* three times in a row without any auditory cues. The response time (ms) was recorded for each trial.

Imagination of the FST. After the subjects' initial performance on the FST task was assessed, two electrodes were attached to the subject's left leg over the *tibialis anterior* and the *soleus* muscles to record electromyographic activity during the covert conditions. If such activity was present, subjects were asked to relax, and repeat the imagined block of trials until no significant change of EMG signal was observed. Subjects in the MI and CT groups were asked to use MI in the first-person perspective (i.e., as if they were doing the action themselves), while those in the VR group had to use verbal rehearsal of the sequence. Subjects imagined, as quickly and as accurately as possible, four blocks of 6

sequences with both sequences, starting with the same sequence they began with during the physical execution of the task. Note that there was no Random condition for the mental performance. Motor imagery involved the imagination of the visual and kinesthetic components of the movements as if performing the task. By contrast, verbal rehearsal consisted of silent repetition of the sequence of foot positions (i.e., "up-down-down-up-down-up"). After the start signal, subjects had to monitor with their eyes closed and count on their fingers the number of sequences they performed mentally, in order to indicate the exact moment at which they completed one block (6 sequences) of trials. The time, in seconds, taken to imagine each block was recorded with a stopwatch.

Mental Practice. As mentioned earlier, subjects in the MI group practiced using motor imagery, subjects in the VR group used verbal repetition of the sequence positions, while subjects in the CT group were not given any instructions about MI nor about verbal rehearsal, and thus did not practice any sequence mentally. Subjects in the MI and VR group were asked to complete 12 practice periods at home before coming to the next testing session. During each practice period, subjects had to assume a sitting or supine position, and imagine the sequence for 10 separate blocks of trials (10 X 6 sequences = 60 sequences per practice period). Thus, subjects in the MI and VR groups rehearsed 720 times their Practiced Sequence between each testing session. Subjects were given a logbook in which they were asked to register the time and duration of each training period, as well as to rate the vividness and kinesthetic sensation felt during MI (MI group), or the level of concentration achieved (VR group) in each training session. Even if subjects in the CT group did not practice any sequence mentally, they came back to the laboratory for weekly evaluations.

Testing Sessions 2 to 6

During each testing sessions, which took place on average 8.4 days (SD = 1.7) apart, subjects had to perform the foot-sequence task both physically and mentally as described previously in the first testing session, except that only two blocks of practice on each

sequence (instead of four) were administered. Therefore, all subjects were tested on the FST on two blocks of the Practiced sequence, two blocks of the Non-Practiced Sequence and two blocks of the Random condition. Again, subjects in the MI and CT groups were asked to perform the task using motor imagery, while subjects in the VR group were required to use verbal rehearsal. Muscle activity over the *tibialis anterior* and *soleus* was measured again in either Session 5 or 6 to insure that repeated mental practice did not induce muscular activity. At the end of Session 6 subjects were again given the KVIQ to be completed at home in the next few days to determine whether the perception of their imagery ability had changed after several weeks of mental practice.

Testing Session 7: Long-Term Retention

All of the subjects who participated in this experiment were later invited to come back to the laboratory for a retention test. Subjects were not told about this test to insure that no further practice would occur after the training sessions. Twenty-four subjects (MI, $n = 9$; VR, $n = 8$; CT, $n = 7$) were re-tested on average 206 (SD = 46) days after Session 6. They completed two blocks of the practiced sequence, two blocks of the non-practiced sequence and two blocks of the random condition. They also imagined two blocks of each sequence as described previously.

Data Analysis

In all conditions, and for all groups, response times measured in ms were converted into a percentage of improvement using the performance level obtained in Session 1 (baseline). This transformation was performed in order to examine group differences in learning using a normalized measure. Even though subjects received practice trials before testing began, performance on the FST was very variable in Session 1 and was susceptible to order effects that counterbalancing could not prevent, due to the limited number of subjects in each group. Thus, the performance of each subject during baseline, to which subsequent values were compared, consisted of 1) the average response time from of all

the sequence blocks of the sequence condition obtained in Session 1 for the sequence conditions, and 2) the average response time from of all the random blocks obtained in Session 1 for the random condition. Hence, a level of improvement after one week of practice (Session 2: Early Learning), five weeks of practice (Session 6: Late Learning), and after an interval of 18 weeks (Session 7: Retention), was obtained for each group in each condition. The significance level was set at 0.05.

Results

Analysis of the Physical Performance

A 3 X 3 X 3 (Group X Session X Condition) analysis of variance (ANOVA) with two repeated measures was first conducted. The results showed significant main effects of Session ($F(2,42) = 17.38$, $p < 0.001$) and Condition ($F(2,18) = 16.58$, $p < 0.001$). However, neither the main effect of Group ($F(2,21) = 1.50$, $p > 0.05$), nor any interaction involving the variable Group reached statistical significance ($p > 0.05$). The only exception was the Session X Condition interaction ($F(4, 84) = 3.21$, $p < 0.05$). However, because we had specific *a priori* hypotheses based on previous pilot data (not shown here), intra-group analyses were conducted to compare the difference in learning across the conditions.

Intra-Group Analyses

Acquisition of the sequence was first assessed for each group separately by comparing the Practiced Sequence and Random conditions directly using a 2 X 3 ANOVA (Condition X Session) for repeated measures. The results for the MI group (see Figure 2) revealed significant main effects of Condition ($F(1,9) = 19.86$, $p < 0.01$) and Session ($F(2,18) = 14.14$, $p < 0.001$), as well as a significant Condition X Session interaction ($F(2,18) = 4.62$, $p < 0.05$). Decomposition of this interaction using the Newman-Keul's procedure showed that the subjects' performance on the Practiced Sequence improved significantly more than performance on the Random condition across the three learning stages ($Q =$

6.13, 37.38 and 5.6, respectively). Furthermore, the results revealed that subjects who practiced the sequence improved significantly after five weeks of practice ($Q = 62.01$), but that their performance then declined after an interval of 18 weeks without practice ($Q = 13.49$). However, performance after 18 weeks was still superior to that after the first week of practice ($Q = 17.66$), suggesting that part of the learned skill was retained. The significant difference between the Practiced Sequence and Random conditions after the 18-week ($Q = 5.36$) interval further suggests that retention was more than the maintenance of a general ability to use the apparatus, and implies that retention was specific to the sequence.

Insert Figure 2 about here

The same analysis performed on the data from the VR group (see Figure 3) also revealed significant main effects of Condition ($F(1,9) = 12.06, p < 0.01$), Session ($F(2,18) = 9.11, p < 0.01$), and a significant Condition X Session interaction ($F(2,18) = 4.10, p < 0.05$). Decomposition of this interaction, using again the Newman-Keul's procedure showed that performance in the Practiced Sequence improved significantly more than that of the Random condition after five weeks of practice ($Q = 19.25$). Furthermore, although a significant improvement was noted between the first and fifth week of practice ($Q = 60.36$), a significant decrease was noted after the 18-week interval ($Q = 30.24$). Contrary to the results from the MI group, subjects in the VR group, on average, did not show any retention of the skill after 18 weeks as compared to the performance after 1 week of practice ($p > 0.05$). In other words, subjects in this group, lost most of the acquired ability, to execute rapidly one particular sequence (i.e., no difference between the Practiced sequence and random conditions in the retention session).

Insert Figure 3 about here

A similar 2 X 3 ANOVA (Condition X Session) applied to the data of the CT group (see Figure 4) failed to identify any significant main effect of Condition ($F(1,9) = 4.80, p > 0.05$), or any significant Condition X Session interaction ($F(2,18) < 1, p > 0.05$). However, the main effect of Session reached the level of significance ($F(2,18) = 3.43, p = 0.05$), and suggested that subjects performance in the CT group improved after 5 weeks of practice and that it had not significantly declined after the 18-week interval. This learning likely correspond to the acquisition of the general ability to use the task and respond to auditory cues.

Learning Intervals

In order to examine the effect of varying intervals between sessions for each group, a one-way ANOVA was performed on the number of days separating each of the six learning sessions. There was no significant difference between groups ($F(2,27) < 1, p > 0.05$). The same analysis was applied to the number of days between the Late Learning (Session 6) and the Retention phase (Session 7), and again no significant difference was found between the groups ($F(2, 21) < 1, p > 0.05$), suggesting that the difference in learning cannot be attributed to varying delays between sessions. Moreover, a correlation analysis between the number of days from Session 6 to Session 7 and the improvement in performance for each subject was carried out. This analysis also failed to find any significant relationship between these two variables ($r = 0.36, p > 0.05$), hence suggesting that the level of retention of the skill was not related to the length of the interval.

Insert Figure 4 about here

Learning Specificity

To explore more thoroughly the specificity of the learning in each group, a second set of analyses was performed, this time comparing the level of improvement on the Practiced Sequence with that on the Non-Practiced Sequence. A 2 X 3 ANOVA for repeated measures performed on the data from the MI group revealed significant main effects of Condition ($F(1,9) = 7.21, p < 0.05$), and Session ($F(2,18) = 13.60, p < 0.001$). No significant interaction was found. The main effect of Condition suggests that, regardless of the session, subjects in the MI group showed a significant advantage on the practiced sequence over the non-practiced one. The same analysis conducted with data from the VR group showed no significant effect of Condition ($F(1,9) < 1, p > 0.05$), nor any Condition X Session interaction ($F(2,18) < 1, p > 0.05$). However, the main effect of Session was significant ($F(2,18) = 9.87, p < 0.01$), suggesting that some general learning on the task occurred (i.e., not specific to the sequence practiced). Finally, the same analysis performed on the data of the CT group did not reveal any significant main effects of Condition ($F(1,9) < 1, p > 0.05$), and Session ($F(2,18) = 3.17, p > 0.05$), nor any significant Condition X Session interaction ($F(2,18) = 1.02, p > 0.05$). The latter result suggests that subjects in the CT group did not improve significantly on either Practiced and Non-Practiced sequences across the three sessions. Note that, as mentioned earlier, the CT group nevertheless showed some improvement on the sequence as compared to a random condition.

Analysis of the Mental Performance

Inspection of the results from the Imaginary Distance Index showed that all subjects understood the concept of motor imagery and were able to produce appropriate motor-

related images and sensations. They imagined walking farther when the trials were longer and vice-versa, which is consistent with the chronometry principle (Decety & Michel, 1989). Moreover, all subjects succeeded in engaging in motor imagery or verbal rehearsal without significantly contracting their *tibialis anterior* or *soleus* at the beginning of the experiment. No significant muscular contractions were observed in the second recording session, i.e., after several weeks of mental practice.

The average time, in seconds, taken by each group to imagine one block of the foot sequence (6 sequences) was computed for both the Practiced Sequence and Non-Practiced Sequence conditions. Not surprisingly, visual examination of the data showed that verbal rehearsing of the foot positions took about one third of the time required to imagine them using motor imagery. This suggests that subjects in the MI group were complying with the imagery instructions as it took them more time to imagine the movements than it took subjects of the VR group to repeat covertly the foot positions. Therefore, subsequent analyses of the mental performance only included the data from the MI and CT groups, as both used motor imagery, while the VR group did not. The raw data was transformed into a percentage of improvement using performance in Session 1 as baseline. Improvement after one week of practice (Session 2), five weeks of practice (Session 6) and an 18-week interval (Session 7) was obtained for both MI and CT groups, and for both sequences (not shown).

Intra-Group Analyses

A 2 X 3 (Condition [practiced vs non-practiced] X Session) ANOVA with repeated measures on the data from the MI group did not reveal any significant main effect of Condition ($F(1,9) = 1.46, p > 0.05$), Session ($F(2,18) < 1, p > 0.05$) nor any significant Condition X Session interaction ($F(2,18) = 1.28, p > 0.05$). This suggests that after the first week of practice, the subjects' imagined performance in the MI group did not improve further. They had already improved, however, on average by 26 % between the baseline (Session 1) and the first week of practice (Session 2). The same ANOVA applied

to the data from the CT group produced a different pattern of results. In fact, while the main effect of Condition ($F(1,9) = 1.48, p > 0.05$) and the Condition X Session interaction ($F(2,18) = 1.29, p > 0.05$) did not reach statistical significance, there was a main effect of Session ($F(2,18) = 14.25, p > 0.05$). Decomposition of this main effect showed that subjects in the CT group improved more in Session 6 and 7 than in Session 2. Since these subjects did not practice between sessions, these data suggest that the minimal physical and mental training performed during each evaluation session was sufficient to improve MI performance.

Inter-Group Analyses

In order to measure the effect of MI training on MI performance, we compared directly the improvement in performance for the Practiced sequence condition of both MI and CT groups in Session 2, 6 and 7 (see Figure 5). The resulting 2 X 3 (Group X Session) ANOVA for repeated measures yielded a significant main effect of Group ($F(1,14) = 11.61, p < 0.01$), thus confirming that subjects from the MI group showed greater improvement in their MI times than those of the CT group. The main effect of Session ($F(2,28) = 2.16, p > 0.05$) and the Group X Session interaction ($F(2,28) < 1, p > 0.05$), however, did not reach statistical significance.

Insert Figure 5 about here

Mental Chronometry

Careful examination of our data to explore the principle put forward by different authors, that there exists a chronometric similarity between imagined and executed movements (i.e., people take on average the same time to imagine as to execute a motor task), led to an unexpected finding. In fact, when we examined individual data, and compared directly the time taken to imagine one block of sequences with the time taken to execute it, we

noticed that some subjects tended to take more time during the imagination than during the execution of the task (over-estimators), some subjects took approximately the same amount of time, and others took less time to imagine the task than to execute it (under-estimators) (see Figure 6). Moreover, this characteristic of the subjects' imagination was found to be relatively constant across the experiment. Since the distribution of this unsuspected characteristic amongst the different groups was not balanced across the groups, we did not pursue the comparison between the time taken by subjects to imagine and the time taken to execute the task. Even though as a group, our whole sample might have shown a similarity between executed and imagined movement, this principle did not appear to hold on an individual basis. Moreover, this characteristic of each subject seemed to be fairly stable and did not seem to be altered following intensive MI practice.

Insert Figure 6 about here

Analysis of the KVIQ results

In order to examine whether some of the results described above could be explained by the subjects' ability to use imagery, we compared the KVIQ scores of the three groups. First, a one-way ANOVA was performed on the total scores obtained during the first administration of the questionnaire in each of the three groups. This analysis showed a significant main effect of Group ($F(2,27) = 6.13, p < 0.01$). Decomposition of this effect revealed that the CT group scored lower than the VR group and the MI groups ($p < 0.05$). A similar analysis applied only to the kinaesthetic scores of the questionnaire again revealed a significant Group effect ($F(2,27) = 5.77, p < 0.05$), hence showing that the subjects in the CT group rated themselves as being better at eliciting kinaesthetic sensations than the subjects in the VR group. Finally, analysis of the visual scores of the questionnaire did not reveal any significant main effect of Group ($F(2,27) = 2.19, p >$

0.05). Thus, none of the analyses described revealed a significant difference between the imagery abilities reported by the MI and the VR groups. The only difference observed was that subjects in the CT group reported that they were better imagers in general than the subjects in the other two groups.

To determine whether mental practice of a skill during several weeks altered the subjects' perception of their imagery abilities, we compared the results obtained with the KVIQ at the beginning of the experiment with that obtained after practice. A 2 X 3 (Session X Groups) ANOVA with repeated measure was performed. The main effect of Session, as well as the Group X Session interaction failed to reach the level of significance ($F(1,21) < 1, p > 0.05$, and $F(2,21) < 1, p > 0.05$, respectively), suggesting that subjects, on average, did not change their rating of their own ability over time.

Discussion

Physical performance

The results of this study demonstrate that mental practice with motor imagery enhances the performance of a motor skill. MI training of a foot-sequence task improved the response time of subjects on the practiced sequence more than it did for randomly presented trials. Furthermore, although verbal rehearsal of a sequence of movements improved the subjects' performance as well, the learning associated with MI was more specific to the practiced sequence, and more importantly, it was found to be more durable after a six-month interval than with VR.

Although inconsistent with our working hypothesis, the improvement in motor sequence learning following practice with VR can be explained based on findings from the mental practice literature. Indeed, it is generally agreed that tasks involving high cognitive demands are more susceptible to show changes following mental practice than task that are "purely" motor in nature (e.g., Driskell et al., 1994; Feltz & Landers, 1983). In the

present experiment, learning of the FST occurred when subjects responded increasingly faster to an auditory stimulus by moving their foot to the designated target (cued response). Because all subjects knew the sequence explicitly at the beginning of the experiment, the change in performance cannot be due to declarative memory processes *per se*. However, the multi-modal integration needed for movement selection, sound discrimination, and anticipation of the forthcoming foot position, requires high cognitive (yet procedural) demands. It is thus possible that different types of mental practice (i.e., MI and VR) can strengthen the synchrony between the different elements and modalities involved in the Foot-Sequence Task. For example, intensive verbal rehearsal of a sequence of movements could help blend the different positions into a single unit (sequence), which could then be synchronized with other aspects of the task such as the auditory stimuli and the foot movements (i.e., procedural learning).

A link between language and movements has recently been proposed by Annett (Annett, 1995; Hall, et al., 1997) in his Language-Action model of imagery (see Figure 7). According to this model, the Action-Language bridge would, for example, allow people to verbally describe a complex action such as tying a knot in a shoe lace. This bridge would also be responsible for the mispronunciation we make in our inner-speech when we speak to ourselves with a pen in our mouth. Assuming the existence of such a close relationship between language and movements, it is conceivable that by rehearsing the different foot positions, subjects also covertly evoke part of the action itself, and thereby engage procedural systems involved in motor sequence learning.

Insert Figure 7 about here

Interestingly, however, verbal rehearsal of the sequence led to less durable performance improvement than MI, arguing in favour of the key role of MI in MP. Procedural learning is known to be highly resistant to the passage of time. Considering that subjects in the MI group showed greater retention of the skill than those in the VR group, it appears that the learning associated with MI is possibly more procedural in nature than the one observed with VR. One more point to consider with regards to the discrepancy in the retention of the MI and VR groups is that MI may tap into a broader range of processes related to the execution of a skill. For instance, some authors have proposed that MI is closely linked to the motor preparation of an action (e.g., Decety et al., 1994), and it is thus possible that verbal rehearsal helps the execution of a skill, but does not necessarily improve its preparation as specifically as MI does.

Another significant finding of the present study, which argues in favour of the key role of MI in mental practice, is the specificity of the skill acquired with practice. Comparison of the learning observed with the practiced sequence and that observed with the random condition (which taps into the general aspects of the task) suggests that subjects in both VR and MI groups acquired some sequence-specific knowledge. However, comparison between the practiced and the non-practiced sequence showed that learning in the VR group was not specific to one unique sequence. Is it possible, therefore, that part of the learning was generalized from one sequence to the other? Recent evidence shows that in explicit conditions, the learning of the abstract structure of a sequence can be generalized to an isomorphic sequence (Dominey, Lelekov, Ventre-Dominey, & Jeannerod, 1998). The abstract structure is defined by the relationship between repeating sequence elements. For example, the sequences ABCABC and DEFDEF share the same abstract structure or format that follows the rule 123123 (Dominey et al., 1998). Considering that the two 6-element sequences used in the present experiment shared the same abstract structure ABBABA, it is possible that part of the learning observed was due to the acquisition of the abstract structure of the sequence, and that practice with verbal rehearsal could be more susceptible to this type of generalization than practice with MI.

Mental performance

Several chronometric studies have suggested that the time taken to imagine a movement is similar to that taken to execute the same movement (Decety, Jeannerod & Prablanc, 1989; Decety & Michel, 1989; Sirigu et al., 1995). Does this relationship hold after a series of movements has been learned through MI practice? Our results suggest that the principle of chronometry between imagined and executed movements applies even after intensive mental training. During the course of the experiment, the time taken to imagine the foot-sequence decreased with practice in both the MI and CT groups, but more so in the MI group. Subjects in the CT group did not practice between sessions, but got minimal physical practice during each session, which was sufficient to show improvement in the imagined performance.

Two important observations were noted during the analysis of the imagined performance of subjects. First, subjects in the MI group displayed the largest decrease in imagined times after only one week of intensive mental practice, hence suggesting that imagined performance improves rapidly, and possibly faster than executed performance. Second, analyses of individual data for the physical and mental conditions suggests that each subject has his own strategy for imagining movements, and that this strategy remains fairly constant from one trial to the next. This observation was unexpected and actually prevented us from comparing systematically the executed and imagined performance of subjects. Indeed, we found that on an individual basis, when subjects imagine a series of movements, they often under-estimate or over-estimate the time it takes to complete a task. Group data suggested that there is a congruence between imagined and executed performance as other authors have shown (e.g., Decety & Michel, 1989), but individually, subjects are rarely perfectly synchronized. In addition, the results show that subjects remained either under-estimators or over-estimators, even after extensive MI practice. This suggests that the ratio between imagined and executed performance is related to individual differences rather than to the performance level of a skill *per se*. Systematic

investigation of this characteristic could reveal, for example, that congruence is not a necessary prerequisite for MI practice, nor is it a desired outcome. However, before further experimentation is undertaken, this estimation factor should be taken into consideration and measured when comparing imagined and physical performance of subjects, in order to counter-balance the experimental groups according to this variable.

Finally, the scores of the KVIQ did not significantly change after extensive MI training, which also supports the notion that some characteristics of subjects' MI ability (in this case their subjective imagery rating) are relatively stable over time.

Conclusion

Taken together, the results of the present experiment suggest that MI is a key component in the mental practice of a motor skill. Although other MP techniques can lead to some improvement in performance, covert imagination of the movements themselves with MI appears to generate more specific and more durable gains in performance. The results also add to the understanding of processes involved in MP and open the door for new applications of this training method. As suggested by numerous authors (Decety, 1993; Richardson 1964; Van Leeuwen & Inglis, 1998; Warner, & McNeill, 1988), the use of MP with MI could provide a great adjunct to traditional physical therapy in a rehabilitation setting, where specific series of movements often need to be learned or re-learned.

References

- Annett, J. (1995). Motor imagery: perception or action? *Neuropsychologia*, *33*, 1395-1417.
- Corbin, C.B. (1972). Mental practice. In W. P. Morgan (Ed.), *Ergogenic Aids and Muscular Performance*. New York: Academic Press.
- Decety, J. (1993). Should motor imagery be used in physiotherapy?: Recent advances in cognitive neurosciences. *Physiotherapy Theory & Practice*, *9*, 193-203.
- Decety, J., & Michel, F. (1989). Comparative analysis of actual and mental movement times in two graphic tasks. *Brain and Cognition*, *11*, 87.
- Decety, J., Perani, D., Jeannerod, M., Bettinardi, V., Tadary, B., Woods, R., Mazziotta, J.C., & Fazio, F. (1994). Mapping motor representation with positron emission tomography. *Nature*, *371*, 600-602
- Decety, J., Jeannerod, M., & Prablanc. (1989). Timing of mentally represented actions. *Behavioral Brain Research*, *34*, 35-42.
- Dominey, P.F., Lelekov, T., Ventre-Dominey, J., & Jeannerod, M. (1998). Dissociable processes for learning the surface structure and abstract structure of sensorimotor sequences. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *10*, 734-751.
- Driskell, J.E., Copper, C., & Moran, A. (1994). Does mental practice enhance performance? *Journal of Applied Psychology*, *79*, 481-492.
- Feltz, D.H., & Landers, D.M. (1983). The effects of mental practice on motor skill learning and performance : a meta-analysis. *Journal of Sports Psychology*, *5*, 25-57.
- Hall, C.R., & Pongrac, J. (1983). *Movement Imagery Questionnaire*. Faculty of Physical Education. The University of Western Ontario, London, Canada.
- Hall, C., Moore, J., Annett, J., & Rodgers, W. (1997). Recalling Demonstrated

- Movements Using Imaginary and Verbal Rehearsal Strategies. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 68, 136-144.
- Jackson, P.L., Lafleur, M.F., Malouin, F., Richards, C.L., & Doyon, J. (2001). Potential role of mental practice using motor imagery in neurological rehabilitation. *Archives of Physical Medicine & Rehabilitation*, 82, 1133-1141.
- Malouin, F., Doyon, J., Dumas, F., Jackson, P.L., Evans, A.C., & Richards, C.L. (1997). Mental representation of locomotion: a PET study. *NeuroImage*, 5, s132.
- Nissen, M.J., & Bullemer, P. (1987). Attentional requirements of learning: evidence from performance measures. *Cognitive Psychology*, 19, 1-32.
- Richardson, A. (1964). Has mental practice any relevance to physiotherapy? *Physiotherapy*, 50, 148-151.
- Richardson, A. (1967a). Mental practice: a review and discussion (part I). *Research Quarterly*, 38, 95-107.
- Richardson, A. (1967b). Mental practice: a review and discussion (part II). *Research Quarterly*, 38, 263-273.
- Sackett, R.S. (1934). The influences of symbolic rehearsal upon the retention of a maze habit. *Journal of General Psychology*, 10, 376-95.
- Shanks, D.R., & Cameron, A. (2000). The effect of mental practice on performance in a sequential reaction time task. *Journal of Motor Behavior*, 32, 305-313.
- Sirigu, A., Cohen, L., Duhamel, J.R., Pillon, B., Dubois, B., Agid, Y., et al. (1995). Congruent unilateral impairments for real and imagined hand movements. *NeuroReport*, 6, 997-1001.
- Van Leeuwen R., & Inglis J.T. (1998). Mental practice and imagery: a potential role in stroke rehabilitation. *Physical Therapy Review*, 3, 47-52.
- Warner, L., & McNeill, M.E. (1988). Mental imagery and its potential for physical therapy. *Physical Therapy*, 68, 516-21.

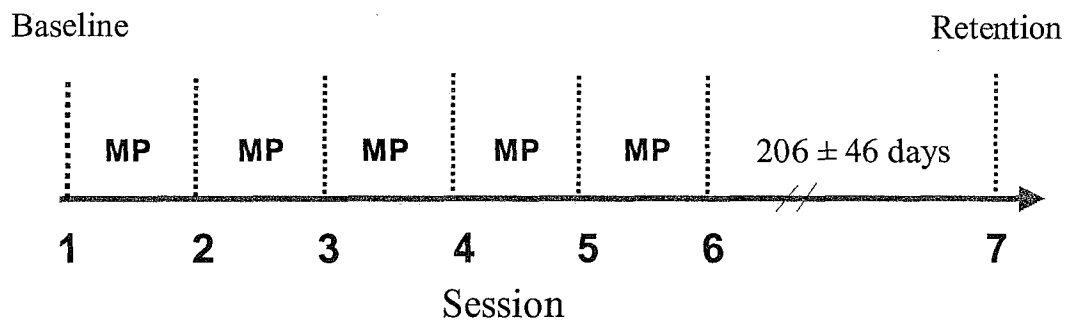


Figure 1: The experimental design comprised seven experimental sessions. Session 1 consisted of the pre-training baseline, Sessions 2 to 6 corresponded to weekly evaluations, and Session 7 was conducted to assess the retention of the skill. Between Sessions 1 to 6, subjects in the MI and VR groups practiced mentally a 6-element sequence of foot movements or foot positions.

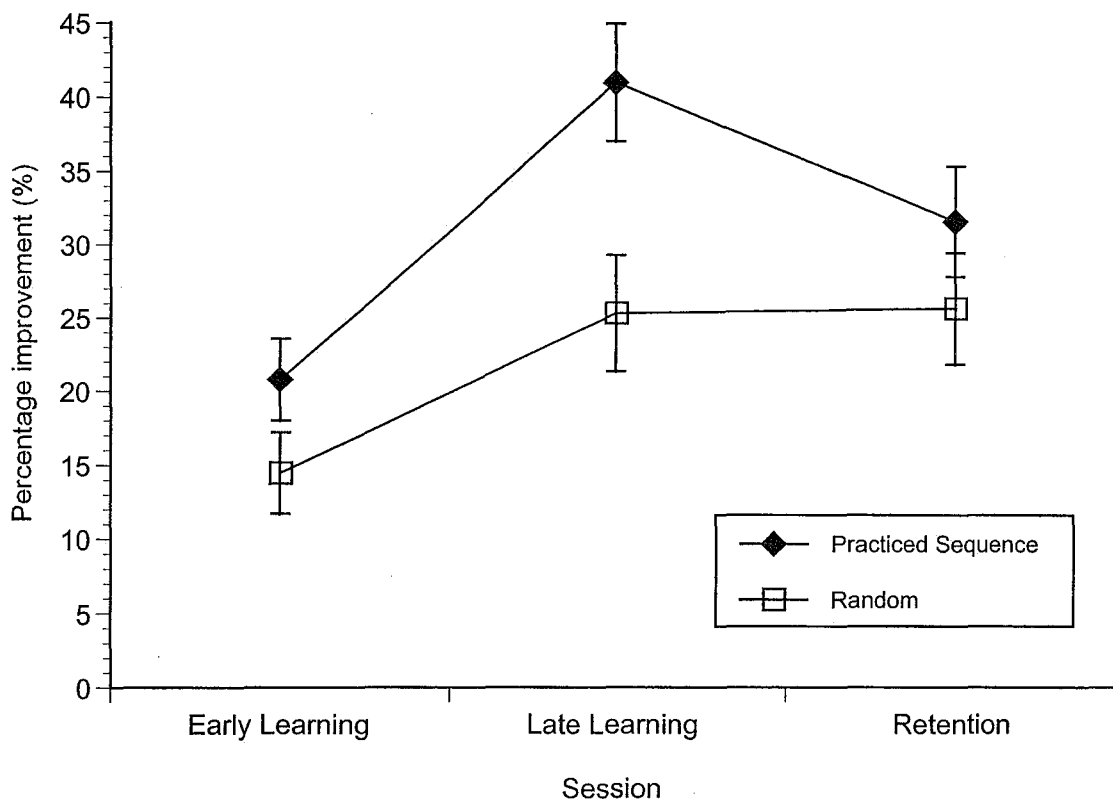


Figure 2: Percentage of improvement in the Motor Imagery group, for the Practiced Sequence and Random conditions, at the beginning (Early Learning), and at the end (Late Learning) of practice, as well as after several months of interval (Retention), as compared to the Baseline performance. Error bars correspond to standard errors.

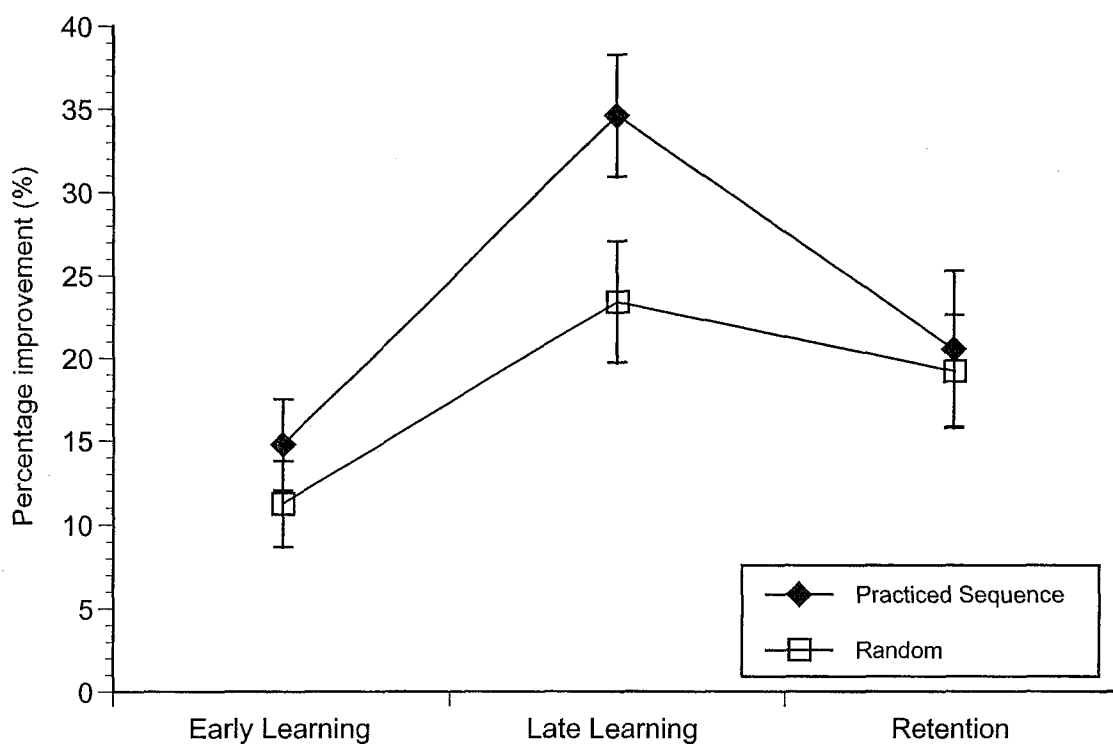


Figure 3: Percentage of improvement in the Verbal Rehearsal group, for the Practiced Sequence and Random conditions, at the beginning (Early Learning), and at the end (Late Learning) of practice, as well as after an interval of several months (Retention), as compared to the Baseline performance. Error bars correspond to standard errors.

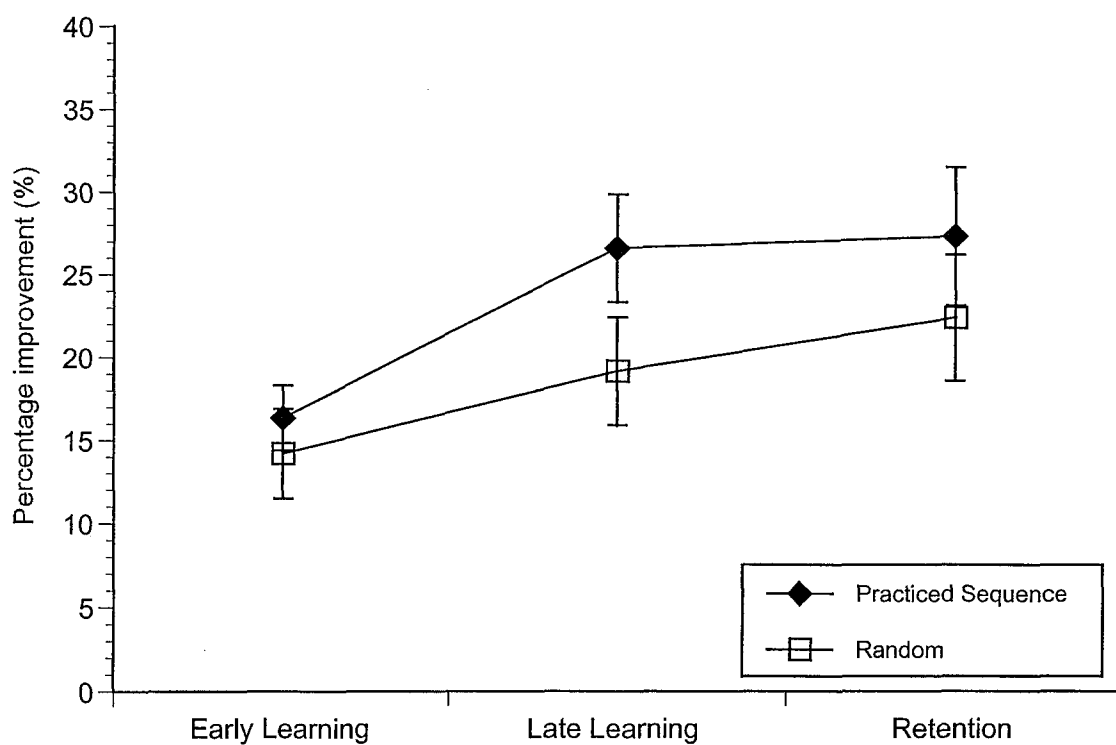


Figure 4: Percentage of improvement in the No-Practice Control group, for the Practiced Sequence and Random conditions, at the beginning (Early Learning), and at the end (Late Learning) of practice, as well as after an interval of several months (Retention), as compared to the Baseline performance. Error bars correspond to standard errors.

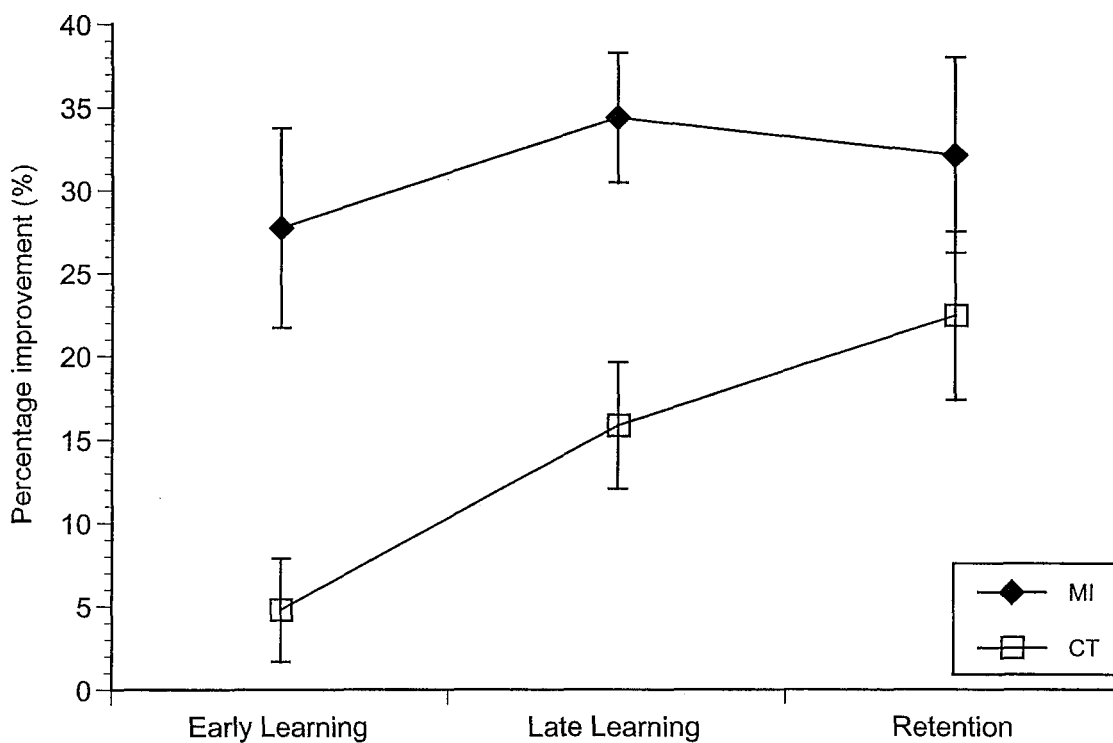


Figure 5: Percentage of improvement in the Imagined Practiced Sequence condition, for the Motor Imagery and Control groups, at the beginning (Early Learning), and at the end (Late Learning) of practice, as well as after an interval of several months (Retention), as compared to the Baseline performance. Error bars correspond to standard errors.

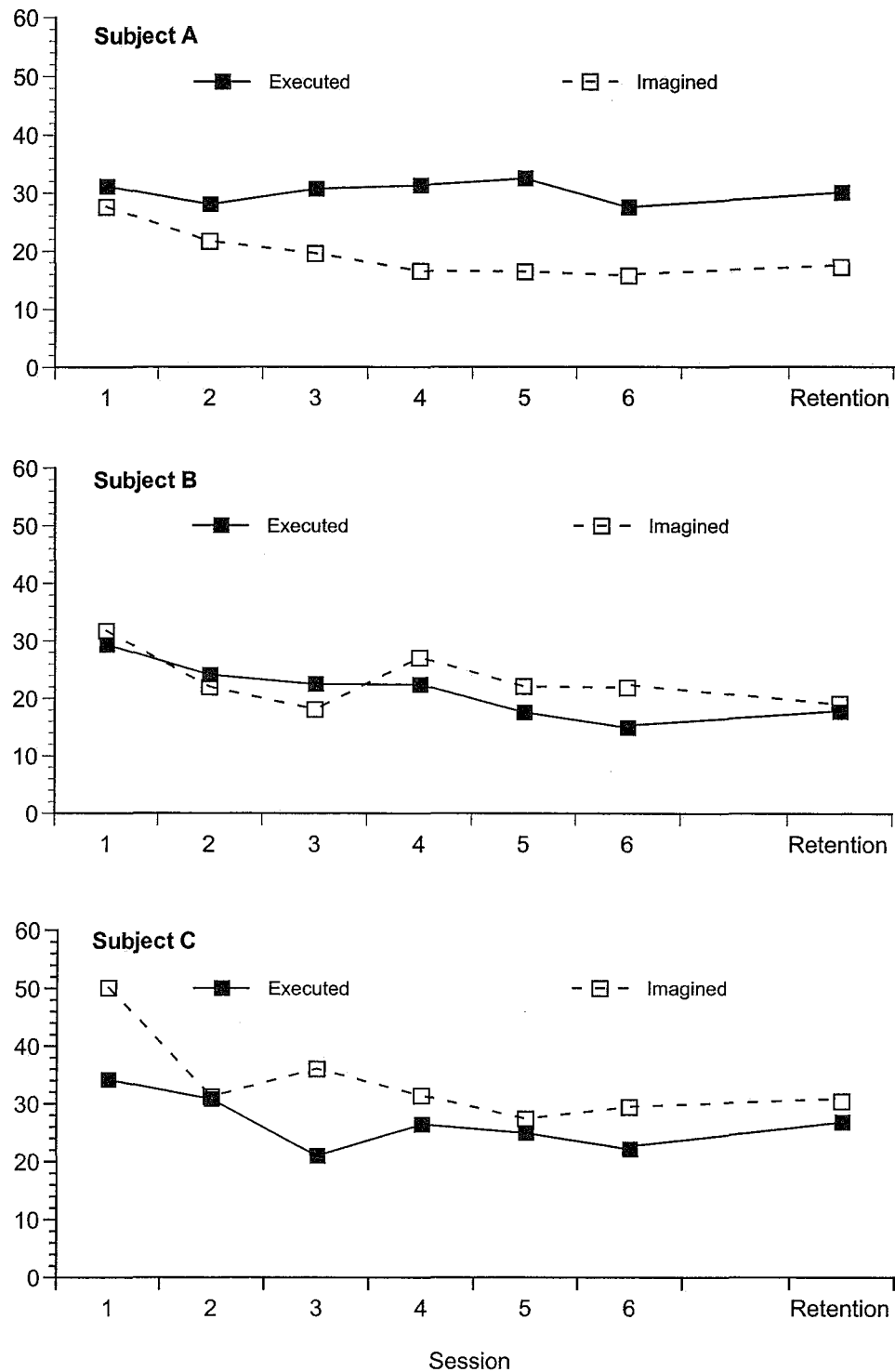


Figure 6: Individual data from three subjects in the Motor Imagery group that showed either underestimation (A), overestimation (C) or correct estimation (B) of the time taken (in seconds) to execute and imagine the foot sequence task.

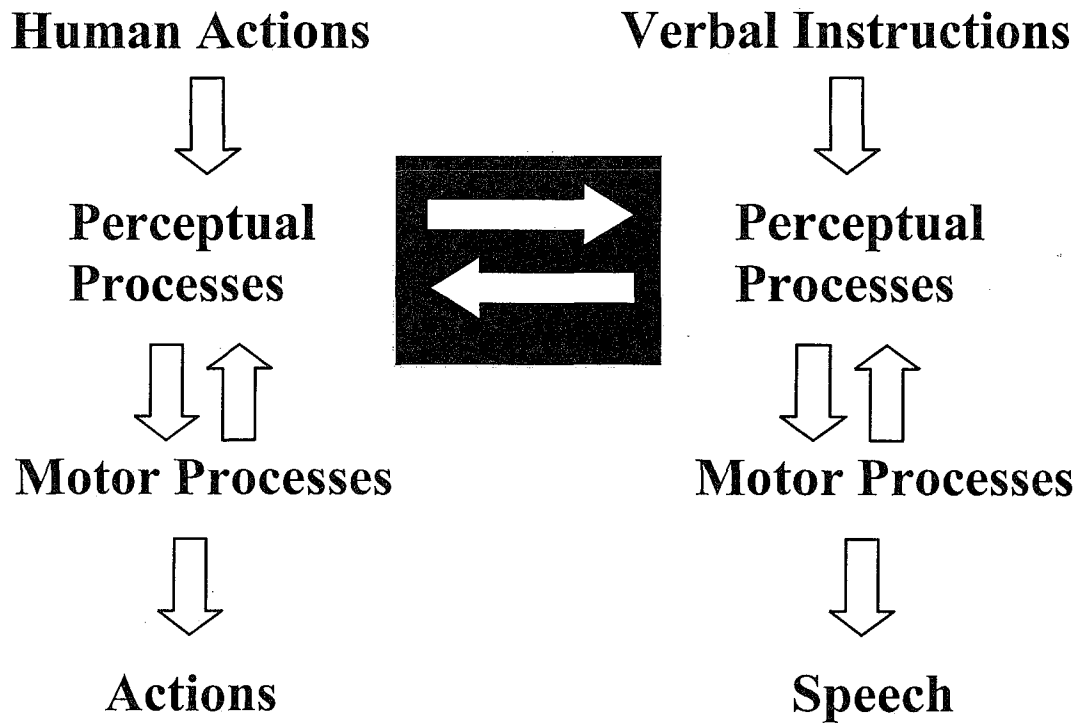


Figure 7: The Action-Language-Imagination Model (Annett, 1995; Hall, Moore, Annett, Rogers, 1997) displaying the relationship between movement and speech (black box = Action-Language Bridge, see text for more details).

CHAPITRE 5

ARTICLE 4:

THE EFFICACY OF COMBINED PHYSICAL AND MENTAL PRACTICE IN THE
LEARNING OF A FOOT-SEQUENCE TASK AFTER STROKE: A CASE STUDY

Résumé

La pratique mentale, une méthode d'entraînement très répandue dans le monde des athlètes, consiste en la répétition imaginée de mouvements sans l'exécution de ceux-ci, ni la production de contractions musculaires associées. Malgré plusieurs écrits proposant l'utilisation de la pratique mentale dans la réadaptation physique de gens ayant un trouble neurologique, très peu de données ont été publiées sur le sujet. Nous présentons ici les résultats d'une étude de cas qui avait comme objectif de mesurer l'effet de la pratique mentale sur l'apprentissage d'une habileté motrice séquentielle chez un patient ayant subi un accident vasculaire cérébral (AVC). Le sujet est un homme droitier de 38 ans qui a eu un AVC sous-cortical gauche quatre mois auparavant. Il a pratiqué une tâche de séquence du membre inférieur pendant une période de cinq semaines. Cette période d'entraînement comportait trois stades distincts soit, deux semaines de pratique physique seule, une semaine de pratique physique combinée à la pratique mentale, et finalement, deux semaines de pratique mentale seule. Les résultats démontrent que le temps de réponse moyen du sujet à la tâche de séquence du pied s'est significativement amélioré au cours de la première semaine (26%) mais est demeuré stable au cours de la deuxième semaine de pratique physique. Cependant, la performance s'est améliorée (10.2 %) dans la semaine où les deux formes d'entraînement étaient combinées. Par la suite, seule une légère amélioration (2.2 %) a été mesurée après les deux semaines de pratique mentale seule. Globalement, ces résultats suggèrent que la pratique mentale bonifie l'apprentissage d'une séquence de mouvements lorsqu'elle est combinée à la pratique physique chez un patient ayant eu un AVC. Finalement, les résultats démontrent que la pratique mentale seule, quant à elle, n'est pas toujours suffisante pour améliorer la performance de façon significative une fois qu'une augmentation significative de la performance a été observée, mais qu'elle s'avère néanmoins utile pour favoriser la rétention de nouvelles habiletés.

The Efficacy of Combined Physical and Mental Practice in the Learning of
a Foot-Sequence Task after Stroke: a Case Study

Philip L. Jackson, MPs^{1,3}, Julien Doyon, PhD^{3,4}, Carol L. Richards, PhD^{2,3}, & Francine Malouin, Ph.D²

¹Department of Psychology, ²Department of Rehabilitation, Laval University, Quebec, Quebec, Canada, ³Rehabilitation and Social Integration Research Centre, Quebec, Canada, and ⁴Department of Psychology, University of Montreal, Montreal, Canada.

This work was supported through a grant from the Fonds de la Recherche en Santé du Québec (FRSQ) to FM, CLR, and JD, and through a doctoral scholarship from the Réseau provincial de recherche en adaptation-réadaptation (REPAR-FRSQ) to PLJ.

Corresponding Author and Reprint Requests:

Francine Malouin, pht, Ph.D.

Rehabilitation and Social Integration Research Centre (CIRRIIS)

Université Laval

525 Hamel Boulevard

Québec, Canada, G1M 2S8

Fax: 1-418-529-3735

E-mail: francine.malouin@rea.ulaval.ca

Abstract

Mental practice is defined as is the repeated imagined reproduction of a motor act without any external output to improve the performance of a skill. This training method is widely used in athletic training. Yet despite frequent suggestions to transfer this technique to neurological rehabilitation settings, very few attempts to test its efficacy with patients who have a cerebral dysfunction have been published. We present the results of a case study that measured the effect of mental practice, and its combination with physical practice, on the learning of a sequential motor skill of the lower limb. The patient was a right-handed 38 year-old man who had suffered a left hemorrhagic subcortical stroke four months prior to the beginning of the experiment. He was asked to practice a serial reaction time task with the lower limb in three distinct training phases over a period of five weeks: two weeks of physical practice, one week of combined physical and mental practice, and then two weeks of mental practice alone. The results show that the subject's average response time improved significantly during the first 5 days of physical practice (26 %), but then fluctuated and failed to show significant improvement during the following week of physical practice. The combination of mental and physical practice during the third week yielded an extra 10.3 percent improvement. Finally, the following two weeks of mental practice resulted in a marginal increase in performance of 2.2 percent. Together, these findings suggest that mental practice, when combined with physical practice can improve the learning of a sequential motor skill in people who had a stroke. While the use of mental practice with motor imagery alone might not be enough to significantly alter the patient's performance after some learning has already been achieved, it is proposed that this therapeutic approach could nevertheless help in the retention of newly acquired abilities.

Introduction

Mental practice (MP) with motor imagery (MI), or the symbolic rehearsal of a physical activity in the absence of gross movement (Richardson, 1967a), has been shown to improve the performance of different motor skills. Several meta-analyses have been conducted and attest to the potential of MP in skill learning, although the general consensus is that MP with MI does not surpass physical practice, but is often found to be superior to no practice at all (Corbin, 1972; Driskell, Copper, & Moran, 1994; Feltz & Landers, 1983; Richardson, 1967a; 1967b). Many researchers over the last 50 years have proposed the use this training technique in physical rehabilitation to help the recovery of patients with motor deficits (e.g., Decety, 1993; Jackson, Lafleur, Malouin, Richards, & Doyon, 2001; Richardson, 1964; Van Leeuwen & Inglis, 1998; Warner & McNeill, 1988). Surprisingly however, very few attempts to test this training method empirically have been published.

In one of the rare studies that looked at the effect of MP in stroke patients, Page and collaborators (Page, Levine, Sisto & Johnston, 2001a) examined the combination of mental practice with regular physical therapy treatments in a patient 5 months post-stroke. The patient was required to engage in mental practice for 10 minutes three times per week over a period of six weeks following physical therapy. Mental practice was done using MI in the third-person perspective and following audio-taped instructions, which described scripts of functional activities that the patient had to imagine as if performed with the affected upper-limb. The patient showed improvement in performance on all of the outcome measures, which comprised the Fugl-Meyer Scale, the Action Research Arm Test (ARA), and the Stroke Rehabilitation Assessment of Movement. Although the beneficial effect attributable to the use of mental practice is almost impossible to tease out from that of the regular physical treatments received by the patient, the authors argued that the improvement observed was specific to the movements that were targeted by mental practice. In fact, they partly controlled for the expected gains usually observed

with natural recovery by taking two baseline measures two weeks apart, and attested to the stability of the patient's performance during that period prior to the treatment with mental practice. A subsequent randomized series of case studies (Page, Levine, Sisto & Johnston, 2001b) using the same training regime, demonstrated that mental practice, combined with standard occupational therapy treatments, yields better improvement on the Fugl-Meyer and ARA scores than occupational therapy combined with a control intervention consisting of information sessions.

The results reported by Page and collaborators (2001a, b) are interesting and contribute significantly to a field where data are scarce. Nevertheless, several questions remain concerning the relationship between the treatment and the changes in the outcome measures. First and foremost, the mental practice treatment itself consisted of "internal cognitive images" of three functional tasks: reaching and grasping a cup, turning the pages of a book, and reaching for and grasping an item on a high shelf, which the patient had to imagine from a third-person perspective. The choice of a third-person instead of a first-person perspective, is rather perplexing since it has often been suggested that MI in the first-person perspective might be best to elicit the kinesthetic components of a movement during imagery (Hall, Schmidt, Durand, & Buckolz, 1994). Nevertheless, patients are encouraged to "feel their fingers" and "see their arm" (Page et al., 2001a), which suggests emphasis on both visual and kinesthetic components. These authors also expected some generalized improvement in function of the upper arm and thus designed an imagery intervention that consisted of both relaxation and imagination of a wide range of movements. In fact, to avoid boredom on the part of the subject over the course of treatment, the authors deliberately used three different cognitive scripts that described three distinct tasks. Even though improvement was suggested by both a functional and an impairment scale, it remains difficult to tease apart which aspect of the imagery treatment was responsible for improving specific behaviors or movements. The results seem to have great ecological validity as they are relevant to daily functions, but the specificity of the learning remains unclear.

Using a multiple baseline design, another recent case study by Yoo and colleagues (Yoo, Park, & Chung, 2001) has also demonstrated that mental practice can help patients with a stroke-related hemiparesis improve their performance in a line-tracing task. Three patients with a right hemiparesis used mental practice first to enhance their level of relaxation prior to practice, and second, to practice drawing a 15 cm straight line with their affected limb. The results showed that mental practice was effective in enhancing the patients' level of relaxation prior to practice, but had mixed results on performance (accuracy and execution time) of the tracing task. One patient improved significantly, another improved moderately, while the third did not improve significantly with mental practice. However, the third patient showed much better performance at baseline than the other two patients, which could indicate a floor effect in his case, preventing further gains via mental practice. The authors consequently argued that mental practice might be a valuable instrument only when substantial gains can still be achieved (i.e., moderate to severe impairments).

Similarly to Page and colleagues (2001a, b), Yoo and collaborators (2001) used audiotapes to guide the patients during the entire mental practice sessions, which raises an important methodological issue. Indeed, many authors have suggested that the use of such tapes might lead to more passivity on the part of the subjects as it takes away part of the control they have over their imagery process (Hall et al., 1994; Warner & McNeill, 1988). Whether such tapes allow room for some individual expression of the imagery process, for example by leaving blanks and pauses, is not specified. Still, this issue has not yet been empirically tested, but it remains counterintuitive at this time to use a tape during the entire mental practice sessions. The use of a tape recorder to present standardized instructions would be a reasonable compromise.

Finally, the results of Yoo and colleagues (2001) also suggest that the improvement in motor performance observed after mental practice on a straight-line tracing task

generalizes “moderately” to a curved-line tracing task. Although “generalizability” is sought after treatment, it also raises some questions concerning the explanation as to how mental practice led to improvements in the patients’ overall performance. What is the underlying mechanism? What does mental practice improve; pencil grasp or hand-eye coordination? Since the use of mental practice in rehabilitation is still in its infancy, would it not be more important to understand the specific effect of mental practice on the learning of a skill in order to be able to reproduce it, rather than its general performance enhancing quality?

The aim of the present case study was thus to assess the effect of introducing mental practice during the training of a specific motor skill in a person who had suffered a stroke. The study was designed to measure the learning of a new foot-sequence task (see Lafleur et al., 2002) during three consecutive training regimes: physical training, combined physical and mental practice, and mental practice alone. This design was chosen because it represents, on a smaller scale, one possible way of introducing mental practice during rehabilitation. By having subjects begin with physical practice, they develop a good representation of the skill. Adding mental practice is then thought to yield additional repetitions without physically fatiguing the patient, and finally, mental practice alone represents the situation of a patient after discharge from the rehabilitation center.

Methods

Subject

The patient was a 38 year old right-handed and right-footed man who suffered a stroke 4 months earlier. Magnetic resonance imaging performed on the day of his stroke displayed a 1 to 2 cm hemorrhage-related lesion extending from the left cerebral peduncle to the left pulvinar of the thalamus. No arterial-vein malformation was observed. The patient initially presented with a severe hemiparesis of his right side, with his upper limb significantly more affected than his lower limb. He also had hypoesthesia of his right side,

which gradually diminished over the following weeks, but did not completely resolve during the course of this study. He had a reduced speed of movement with his right lower limb according to the physical therapist's report (see Table 1). Nevertheless, he reached stage 7 on the foot scale of the Chedoke-McMaster Stroke Assessment Impairment Inventory (see Appendix 3), which indicates that he was able to do rapid toe and heel touches (5 x in 10 seconds), rapid circumduction in both directions, and stand alternatively on his toes and his heels five times in a row.

Insert Table 1 about here

This patient had 15 years of education. An evaluation of his cognitive abilities was conducted by a clinical neuropsychologist during his first month of rehabilitation using the Wechsler Adult Intelligence Scale-Revised, Raven Matrices, Symbol Digit Memory Test, Trails A & B, 2 and 7 Attention Test, Stroop Test, Boston Cancellation Test, Wechsler Memory Scale-Revised, Rey Figure, Rey Auditory Verbal Learning Test, Controlled Oral Word Association, Semantic fluency, Tower of London, and Wisconsin Card Sorting Task. Interpretation of the results by the neuropsychologist, with regards to normative data, showed a significant reduction of psycho-motor speed, a slight decrease in visual attention, reduced verbal encoding abilities (difficulty organizing the information), some difficulty inhibiting distraction in divided attention situations, and markedly reduced lexical verbal fluency. A second evaluation conducted two months later and about one month prior to this experiment showed some general improvement but depicted a persisting reduction in psycho-motor processing, minor verbal learning difficulties, and significantly reduced verbal fluency.

The patient signed an informed consent form to participate in this study. The protocol was approved by the Quebec Rehabilitation Research Institute's ethics committee.

Experimental Design

The design consisted of three distinct training phases on a sequential foot movement task (see Training section). The patient first took part in a baseline session during which his motor imagery ability was measured, and his initial performance on the task was established. The following five weeks consisted of two weeks of Physical Practice (Stage 1), followed by one week of Combined Physical and Mental Practice (Stage 2), and finally two weeks of Mental Practice alone (Stage 3). Performance on the foot sequence task was measured on every session in Stages 1 and 2, and at the end of Stage 3.

Materials

Motor Imagery Tests

The following tests were administered at the beginning of the study to measure the patient's motor imagery abilities.

The Imaginary Tapping Index.

In this home test, the patient was asked to execute and imagine tapping his feet on the floor at a comfortable pace, while counting the number of taps until the experimenter told him to stop. Each trial was terminated after varying randomized intervals (10s, 25s, 45s), such that the patient was unaware of when he should stop tapping, or imagining tapping. One trial was administered with each foot in both physical and imagined conditions, and for each interval. It was predicted that if the patient adequately followed the instructions, and was able to imagine himself tapping his foot, the number of taps produced should be similar in both physical and imagined conditions, and should correlate with increasing delays (see Decety, 1993; Decety & Lindgren, 1991; Decety & Michel, 1989; Lafleur et al., 2002).

Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire (KVIQ). This questionnaire is a modified version of the Movement Imagery Questionnaire (Hall & Pongrac, 1983; Isaac, Marks, & Rusell, 1986), adapted for older subjects and patients with locomotor deficits (see Appendix 2; Roy, Gosselin, Lafleur, Jackson, & Doyon, 1998). It consists of ten questions in which subjects are required to execute a number of purposive movements, immediately followed by the motor imagery of the same movements using a first-person perspective (i.e., as if they were seeing and feeling themselves perform the movements from within). The subjects then rate their capacity to evoke mental images of the action on a five-point scale (1 = high imagery; 5 = low imagery). The subjects are first asked to rate the vividness (Visual sub-scale : from “image as clear as a movie” to “no image”) of the image for each movement, then each movement is rated in terms of intensity with which the movement could be felt during MI (Kinesthetic sub-scale “sensation as intense as during the movement” to “no sensation”). The same ten questions or scenarios are repeated for each sub-scale.

Logbook. Compliance with the mental practice schedule was monitored via a logbook. This consisted of customized notebook with dated pages and identified sections to enter the time at which training was conducted, the number of blocks completed and the average visual and kinesthetic ratings given to the imagined movements during the training session.

Behavioral Test

Foot-Sequence Apparatus and Task. The task was performed in an apparatus that consisted of a wooden pedal (13 x 35 cm), mounted in a wooden frame (45 cm long, 29 cm wide and 60 cm high [see Appendix 1, and Lafleur et al., 2002]). The height and the length of the pedal could be adjusted to standardize the foot position of the patient relative to the ankle’s axis of rotation, and his leg was slightly raised and supported by pillows. The foot was secured by two straps of Velcro attached to the pedal. The patient performed the task in a supine position on a wooden bed covered with a foam mattress. A

potentiometer, fixed on the pedal axis and connected to a relay box, could be adjusted with three tuning knobs to detect three different pedal angles (near maximum dorsiflexion, middle position, near maximum plantarflexion). The relay box was linked to a portable computer running a program using Micro Experimental Lab (MEL) that generated auditory stimuli through a speaker and registered the patient's response times (ms) and accuracy.

The task consisted of executing a dorsiflexion (up movement) in response to a high pitched sound, and a plantarflexion (down movement) in response to a low pitched sound. When the patient reached either the target position (success) or the wrong position (error), the sound was turned off. The patient then had to bring his foot back to a neutral middle position in order to trigger the next auditory stimulus. Each block of trials consisted of a total of 72 movements that had to be executed as quickly and accurately as possible in response to the target auditory stimulus.

Training Procedures

Baseline. After completing the imagery questionnaires, twelve random trials in the FST were administered to familiarize the patient with the apparatus. He was then taught the sequence of six dorsi- and plantarflexions of the ankle (up-down-down-up-down-up), until he was able to reproduce it three times in a row without auditory cues. Stage 1 of training started on that same day.

Phase 1 of the Training Program: Physical Practice. During the first two weeks of training, the patient participated in ten practice sessions (week days), each comprising five blocks of practice with the FST. Each block consisted of 72 trials, or six presentations of the known sequence of six elements, plus each movement towards the middle position. The blocks were separated by one- to five-minute pauses. Thus, the patient executed the

sequence 30 times during each session, for a total of 300 repetitions of the sequence in this training phase.

Phase 2 of the Training Program : Combined Physical and Mental Practice. The patient subsequently took part in five physical training sessions over a one-week period, during which he had to complete five blocks of practice with the sequence as described above (30 sequences per session). Moreover, between each of these sessions, the patient was asked to practice the sequence on his own using mental practice with MI in a first-person perspective. The patient was required to complete two mental practice periods per day between each physical training session. During the mental practice periods, the patient assumed a supine position, and imagined the task for 10 separate blocks of trials (1 block = 6 sequences; 10 X 6 sequences = 60 sequences per practice period) following a set of instructions provided on a sheet of paper (see Table 2). He was also asked to register the time and duration of each training period, as well as to rate the vividness and kinesthetic sensation of the imagined movements in his logbook. Thus overall, the patient executed the sequence 150 times physically in the laboratory, and imagined the sequence 480 times with motor imagery on his own throughout this phase of training.

Insert Table 2 about here

Phase 3 of the Training Program : Mental Practice Alone. Over the following two weeks, the patient was asked to practice the foot sequence mentally on his own during twelve non-consecutive practice sessions. He was asked to complete no more than two training sessions in the same day, and to register the time and duration of each training period, as well as to rate the vividness and kinesthetic sensation of the imagined movements in his logbook. Again, each of these sessions consisted of 10 blocks of trials

with MI (60 sequences), for a total of 720 mental repetitions of the sequence. Final assessment of the physical performance was done at the end of this two-week period by asking the patient to execute five blocks of the sequence as described above in Phase 1 of training.

Outcome Measures and Data Analysis

Motor imagery ability was first assessed by plotting the number of taps the patient was able to imagine and to execute during each time interval of the Imaginary Tapping Index. We expected a strong correlation between the number of taps and the time intervals. Thus, a ratio consisting of the number of taps imagined over the number of taps executed, for each time interval and for each foot, was used as a measure of mental chronometry. The results from the KVIQ consisted of one total score ranging from 20 to 100, and one score for each sub-scale (Visual and Kinesthetic) ranging from 10 to 50. It should be noted that the lower the score, the better a patient rated his imagery ability.

The main outcome measure on the FST consisted of the mean response time in milliseconds to reach each of the target positions (plantarflexion or dorsiflexion). Response times were averaged over blocks of six consecutive sequences, and then averaged for one session of five blocks. Thus, the main measure of performance consisted of the mean response time in every training block averaged over each session. The percentage of improvement over the baseline level of performance in the first session served as an indication of the level of learning acquired. Another outcome measure was the mean standard deviation for one block of 6 sequences, also averaged over the five blocks in each session. Finally, the total number of errors per session was compiled, which provided a third measure of the patient's performance. Note that the performance of the subject was also compared to that of two groups of healthy who underwent a similar training protocol in a previous experiment (unpublished data).

Results

The results obtained with the Imaginary Tapping Index demonstrated that the number of foot movements in the imagined and the executed conditions correlated with the increase in time intervals ($r = .99$). However, the average imagined/executed time ratios for each foot was respectively 0.71 for the right (affected limb) and 0.73 for the left (non-affected limb), suggesting that the patient made, on average, about 30% fewer taps during the imagined condition than during the executed condition. Together, these results suggest that the patient was consistent in his use of motor imagery, but that he imagined movements with both feet slightly more slowly than he executed them. The results of the KVIQ showed a score of 40 for the visual, and 29 for the kinesthetic component, and a total score of 69, which suggests that the patient was consistently better at eliciting the kinesthetic than the visual aspect of the motor acts he was required to imagine. In fact, the correlation between the scores of the two scales was only 0.56.

Inspection of the logbook data from Phase 3 of training indicates that the patient practiced the sequence on 11 instead of 12 occasions as required. The total number of repetitions of sequence was thus 660 (11 x 60) instead of the expected 720 during the Mental Practice Only condition, which indicates a compliance of 92%. The quality of the images and the intensity of the sensations imagined were rated average (i.e., 3/5) in all of the mental practice sessions, except in the fourth sessions during the Combined Physical and Mental Practice period, during which the patient rated the imagined movements as 4/5 on both scales (blurry image and vague sensation). These results indicate that overall, the patient did not have any major difficulty in imagining the movements, and that his perception of the visual component of his motor imagery ability improved slightly during training as compared to the results obtained with the KVIQ.

Visual inspection of the data from the first training phase shows that the patient learned the foot sequence task across the ten sessions (see Figure 1a). He reached on average, a response time of 511 ms on the last training session, which corresponds to a 26%

improvement in performance compared to his baseline performance on Session 1. His performance continued to improve, from 507 to 455 milliseconds (an additional 10.3% improvement), during the following week in which the patient combined physical and mental practice. The last two weeks of practice only had a marginal effect on the patient's average response time, which dropped by 10 ms hence representing an additional 2.2% improvement.

Insert Figure 1 about here

Examination of the average standard deviations (see Figure 1b) taken from each block of trials for each session clearly shows that the patient learned to be more consistent in his performance, and that he improved his timing between the cues and the corresponding movements.

The decreasing number of errors made on the FST across the experiment also attests to the global learning displayed by the patient (see Figure 1c). However, this measure showed more fluctuation than the response times and the addition of mental practice did not improve this aspect of performance as the patient had already reached a minimal number of errors (floor effect).

Discussion

This experiment was the first attempt at measuring the effect of mental practice on the learning of a specific motor skill for the lower limb in a patient who had a stroke. The physical performance of the patient at the beginning of the experiment (average response

time 687 ms) was slower than that of a control group (639 ± 35 ms) composed of 10 healthy patients aged, on average, 50 years of age (Jackson, Lafleur, Malouin, Richards, & Doyon, see Chapter 2), and much slower than a group of younger subjects (597 ± 52 ms). This suggests that the patient was initially slower than what could be expected for his age, and thus, that he still displayed a motor deficit. The main results, however, show that mental practice added to physical practice improved the learning of a foot-sequence task in this subject. Indeed, after two weeks of physical practice, the patient reached a level of performance that appeared asymptotic (i.e., showed no improvement with further physical practice), but still slower than that of older controls (26% slower). Once the mental practice was added however, response times decreased gradually during the practice sessions, strongly suggesting a direct relationship between the use of mental practice and the patient's improvement in performance. Moreover, the absence of variability in the standard deviations over the course of the same week suggests that mental practice facilitated consolidation of this skill, and helped the patient execute it steadily faster over that week. Finally, although performance did not improve significantly after an additional two weeks of mental practice, it was nevertheless maintained at the level reached during the combined methods of practice. After the three phases of training, the patient nevertheless remained about 9% slower than the average response time for the group of older normal subjects after the first two weeks of the physical training condition, which suggest that the patient had not yet improved to normal levels of performance.

Even though the patient displayed initial improvement with the FST, performance seemed to have reached a floor effect where no significant gains were further observed with physical practice. The lack of additional improvement after physical practice was possibly caused by the lack of complete sensory feedback from the foot of the patient. One of the deficits observed that had only partly resolved after 4 months of recovery was a loss of sensation affecting proprioception, light touch and temperature sensitivity on the right side of the body, including the lower-limb. Some studies have suggested that sensory deficits could interfere with motor skill learning (e.g., Nudo, Friel, & Delia, 2000;

Pavlidis, Miyashita, Asanuma, 1993). Introduction of mental practice when performance seems to have reached an asymptote could compensate for this lack of feedback by providing another means (modality) to strengthen the motor program involved in the foot sequence task, for example by reinforcing the non-conscious processing involved in the learning of this task, such as timing between the auditory cue and a specific movement (Jackson, Lafleur, Malouin, Richards, & Doyon, 2001).

Another important finding from this study is that performance gains displayed by the patient with mental practice were observed even though he rated the visual aspect of his imagery ability as being significantly lower than that of healthy subjects. Indeed, if we compare the patient's KVIQ scores with those of 30 healthy subjects gathered from another study (Jackson, Lafleur, Malouin, Richards, & Doyon, in preparation b; see Chapter 3), the patient's overall performance was two standard deviations above (i.e., worse) than that of those controls ($X = 46.77$, $SD = 10.00$). Similar analyses performed on the individual subscales showed that the patient was within normal limits on the Kinesthetic scale of this questionnaire ($X = 25.23$, $SD = 8.36$), but impaired on the Visual scale ($X = 21.53$, $SD = 4.35$). This indicates that the overall imagery rating was influenced by the visual component of the questionnaire, which was generally less well rated by the patient. Moreover, this result suggests that the kinesthetic aspect is perhaps more important than the visual of the movement during with MI. The latter finding suggests either that the results from this type of questionnaire have no bearing on the potential level of improvement in performance observed with mental practice, or that the visual component of motor imagery is not as important as the kinesthetic one in to the learning of the foot-sequence task through MP. Although no study has yet shown that a specific type of imagery is more or less important for certain skills, some researchers believe that kinesthetic imagery is particularly relevant in the mental practice of motor skills (e.g., Hall, Schmidt, Durand, & Buckholz, 1994). Nevertheless, the predictive value of imagery questionnaires or measures of cognitive function with regards to the efficacy of mental practice has yet to be established.

Whether the low result (high score) of this patient on the visual component of the KVIQ is related or not to the slight decrease in visual attention reported in the initial neuropsychological testing cannot be determined at this time as we do not have the individual results for each attention test. Future studies of mental practice with motor imagery in neurological patients should include measures of attention and working memory as these cognitive functions could very well be related to the ability of patients to keep motor images within working memory. It could also be the case that patients with different types of lesions favor or would benefit more from different approaches or perspectives of imagery. Indeed recent studies have shown that the cerebral organization differs depending on the presence or absence of kinesthetic content in the imagery process (Naito et al 2002), and on the perspective adopted by the subjects during motor imagery (Ruby & Decety, 2001).

These preliminary findings open the door for yet another use of mental practice. It could indeed serve as a method to enhance the long-term retention of recently acquired skills. The experimental design used in this study illustrates a feasible way of introducing mental practice to patients. Mental practice could be added to the traditional physical therapy treatments after a few weeks of training, and even earlier once the patients have a good representation of the movements to be rehearsed. Upon discharge from the rehabilitation center, the patient would be fully familiar with the mental practice method and would be able to continue treatment unassisted.

One important limitation of our results is that they do not directly address whether mental practice with motor imagery can improve a patient's global level of functioning. The clinical data presented in Table 1 show how the patient had already recuperated a high level of functioning at the beginning of the experiment, especially with the lower limb. This left little room for functional improvement. Even though the FST task does not represent a specific functional activity, the movements required by this task are important

for some skills, and it would be interesting to measure in future studies whether learning of the FST through mental practice generalizes and has an impact on daily activities such as walking.

Conclusion

Overall, the results of this case study suggest that mental practice, combined with intensive physical practice, can lead to further improvement in the learning of a specific lower-limb motor skill after stroke. Although these findings cannot be generalized to all stroke patients, they constitute another step toward the demonstration that this technique could be used as an adjunct to already established rehabilitation methods.

References

- Corbin, C.B. (1972). Mental practice. In W. P. Morgan (Ed.), *Ergogenic Aids and Muscular Performance*. New York: Academic Press.
- Decety, J. (1993). Should motor imagery be used in physiotherapy?: Recent advances in cognitive neurosciences. *Physiotherapy Theory & Practice*, *9*, 193-203.
- Decety, J., & Lindgren, M. (1991). Sensation of effort and duration of mentally executed actions. *Scandinavian Journal of Psychology*, *32*, 97-104.
- Decety, J., & Michel, F. (1989). Comparative analysis of actual and mental movement times in two graphic tasks. *Brain & Cognition*, *11*, 87-97.
- Driskell, J.E., Copper, C., & Moran, A. (1994). Does mental practice enhance performance? *Journal of Applied Psychology*, *79*, 481-492.
- Fansler, C.C., Poff, C.L., & Shepard, K.F. (1985). Effects of mental practice on balance in the elderly. *Physical Therapy*, *65*, 1332-1338.
- Feltz, D.H., & Landers, D.M. (1983). The effects of mental practice on motor skill learning and performance : a meta-analysis. *Journal of Sports Psychology*, *5*, 25-57.
- Hall, C.R. (1985). Individual differences in the mental practice and imagery of motor skill performance. *Canadian Journal of Sport Sciences*, *10*, 17s-21s.
- Hall, C.R., & Pongrac, J. (1983). *Movement Imagery Questionnaire*. Faculty of Physical Education. The University of Western Ontario, London, Canada.
- Hall, C., Schmidt, D., Durand, M.-C., & Buckolz, E. (1994). Imagery and motor skills acquisition. In A.A. Sheikh & E.R. Korn (Eds.), *Imagery in sports and physical performance*. (pp 121-134). Amityville, New York: Baywood Publishing Company.
- Isaac, A., Marks, D.F., & Russell, D.G. (1986). An instrument for assessing imagery of movement: The vividness of movement imagery questionnaire (VMIQ). *Journal of Mental Imagery*, *10*, 23-30.
- Jackson, P.L., Lafleur, M.F., Malouin, F., Richards, C.L., & Doyon, J. (in preparation a).

Validation of a sequential learning task for the lower limb.

- Jackson, P.L., Lafleur, M.F., Malouin, F., Richards, C.L., & Doyon, J. (in preparation b). Learning and retention of a foot-sequence task using motor imagery.
- Jackson, P.L., Lafleur, M.F., Malouin, F., Richards, C.L., & Doyon, J. (2001). Potential role of mental practice using motor imagery in neurological rehabilitation. *Archives of Physical Medicine & Rehabilitation*, *82*, 1133-1141.
- Lafleur, M.F., Jackson, P.L., Richards, C., Malouin, F., Evans, A., & Doyon, J. (2002). Motor learning produces parallel dynamic functional changes during the execution and imagination of sequential foot movements. *NeuroImage*, *16*, 142-157.
- Naito, E., Kochiyama, T., Kitada, R., Nakamura, S., Matsumura, M., Yonekura, Y. et al. (2002). Internally simulated movement sensations during motor imagery activate cortical motor areas and the cerebellum. *Journal of Neuroscience*, *22*, 3683-3691.
- Nudo, R.J., Friel, K.M., & Delia, S.W. (2000). Role of sensory deficits in motor impairments after injury to primary motor cortex. *Neuropharmacology*, *39*, 733-742.
- Page, S.J., Levine, P., Sisto, S.A., & Johnston, M.V. (2001a). Mental practice combined with physical practice for upper-limb motor deficit in subacute stroke. *Physical Therapy*, *81*, 1455-1462.
- Page, S.J., Levine, P., Sisto, S.A., & Johnston, M.V. (2001b). A randomized efficacy and feasibility study of imagery in acute stroke. *Clinical Rehabilitation*, *15*, 233-240.
- Pavlidis, C., Miyashita, E., & Asanuma, H. (1993). Projection from the sensory to the motor cortex is important in learning motor skills in the monkey. *Journal of Neurophysiology*, *70*, 733-741.
- Richardson, A. (1964). Has mental practice any relevance to physiotherapy? *Physiotherapy*, *50*, 148-151.
- Richardson, A. (1967a). Mental practice: a review and discussion (part I). *Research Quarterly*, *38*, 95-107.

- Richardson, A. (1967b). Mental practice: a review and discussion (part II). *Research Quarterly*, 38, 263-273.
- Roy, M., Gosselin, V., Lafleur, M.F., Jackson, P.L., & Doyon, J. (1998). Évaluation des qualités psychométriques du Questionnaire d'Imagerie Kinesthésique. *Science et Comportement*, 27, S-191.
- Ruby, P., & Decety, J. (2001). Effect of subjective perspective taking during simulation of action: a PET investigation of agency. *Nature Neuroscience*, 4, 546-550.
- Van Leeuwen, R., & Inglis, J.T. (1998). Mental practice and imagery: a potential role in stroke rehabilitation. *Physical Therapy Review*, 3, 47-52.
- Warner, L., & McNeill, M.E. (1988). Mental imagery and its potential for physical therapy. *Physical Therapy*, 68, 516-521.
- Yoo, E., Park, E., & Chung, B. (2001). Mental practice effect on line-tracing accuracy in persons with hemiparetic stroke: a preliminary study. *Archives of Physical Medicine & Rehabilitation*, 82, 1213-1218.

Table 1: Clinical data of the patient prior to the study

	Oct. 30th 1998	Feb. 17th 1999
Berg Scale	51/56	56/56
Fugl-Meyer Total	77/100	95/100
Fugl-Meyer Upper-Limb	46/66	62/66
Fugl-Meyer Lower-Limb	31/34	33/34
Dorsiflexion-Plantarflexion *	L: 7.26 / R: 8.47	L: 6.16 / R: 7.84
Pronation-Supination *	L: 6.63 / R: 20.70	L: 6.27 / R: 7.98

* = time for 10 repetitions

L = non-affected left side

R= affected right side

Table 2: Motor Imagery Practice Instructions

- 1- Assume a comfortable sitting or supine position
- 2- Imagine the movements using the first-person perspective, as if you were actually executing them.
- 3- Avoid moving or contracting muscles from your leg and your head. Keep a relaxed position.
- 4- Remember to try seeing and feeling the movements as you do when you execute them.
- 5- Keep your eyes closed for the duration of the whole block of trials.
- 6- Keep track of the number of sequences imagined with your fingers, if necessary. You have to imagine that you are performing the sequence 6 times per block.
- 7- If you lose your concentration during a block, open your eyes, relax for a few moments and then start over the same block.
- 8- Remember to imagine the sequences as quickly as possible, while making as few errors as possible.

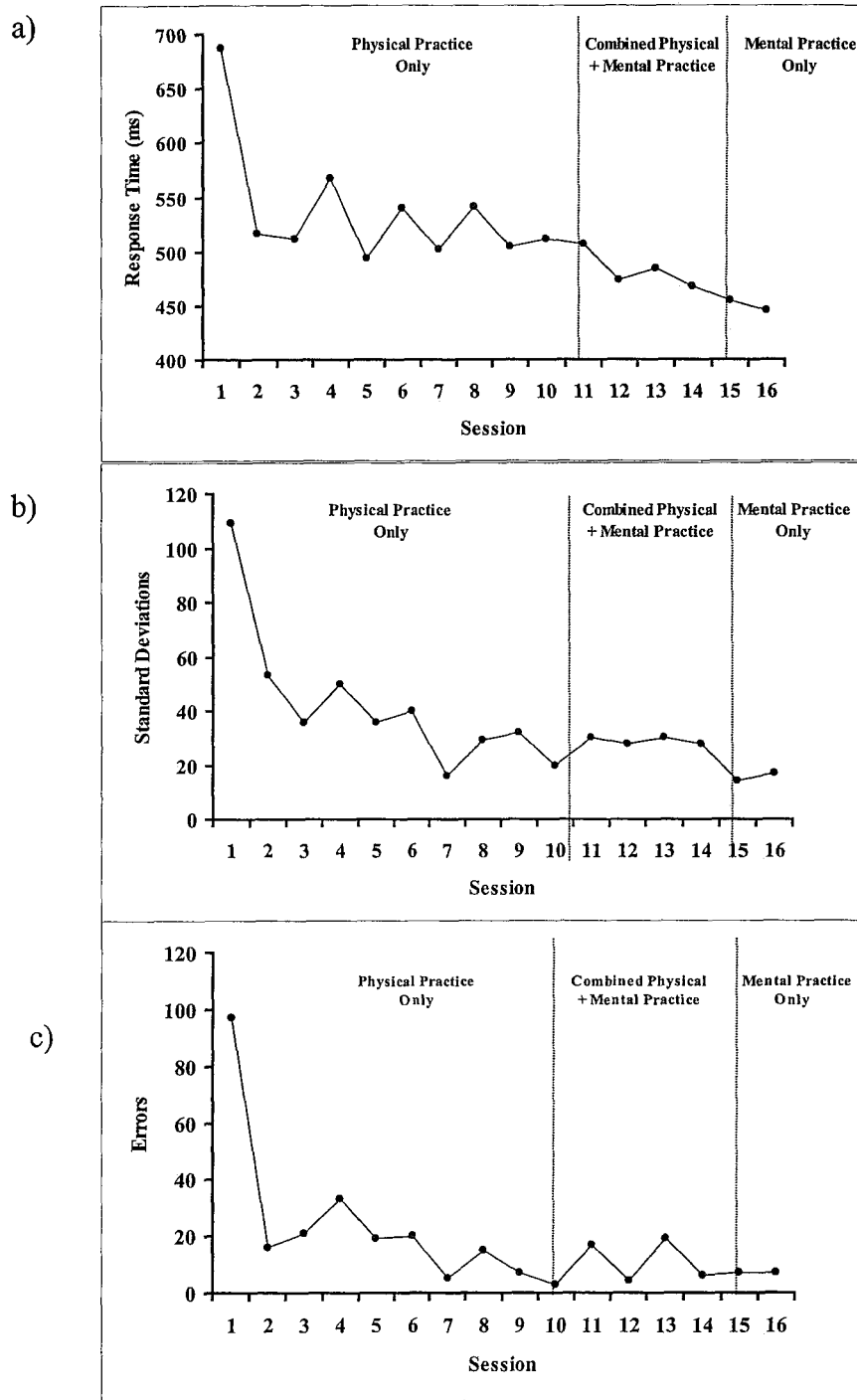


Figure 1: Graph illustrating the patient's a) average response time in milliseconds b) average standard deviation taken from each blocks, and c) average number of errors, for each session, and during the three different training phases (Physical Practice Only, Combined Physical and Mental Practice, Mental Practice Only).

CHAPITRE 6

ARTICLE 5:

CEREBRAL REORGANIZATION ASSOCIATED WITH MOTOR SEQUENCE
LEARNING USING MOTOR IMAGERY PRACTICE

Résumé

Dans cette étude, la réorganisation fonctionnelle de l'ensemble du cerveau induite par l'apprentissage d'une habileté motrice séquentielle à l'aide de la pratique mentale, a été révélée grâce à la tomographie par émission de positrons. À la suite de cinq jours de pratique mentale par imagerie motrice, les sujets ont montré une amélioration significative de leur performance à une tâche de séquence de mouvements du pied, de même qu'une augmentation de l'activité cérébrale dans la région médiane du cortex orbito-frontal. L'augmentation de l'activité cérébrale dans cette région après pratique, semble aussi être organisée selon la modalité d'exécution de la tâche puisque l'imagination de l'habileté active une zone localisée de façon postérieure à celle sollicitée par l'exécution physique de cette habileté. Les liens neuroanatomiques entre l'aspect postérieur de la région médiane du cortex orbito-frontal avec le cortex enthorinal, de même que son rôle dans l'apprentissage par récompense, sont évoqués pour expliquer le rôle de cette structure dans l'apprentissage d'une habileté motrice séquentielle. L'absence de changements significatifs de l'activité cérébrale dans les structures traditionnellement associées à la motricité, tels que le cortex moteur primaire et le striatum, supporte l'hypothèse que la pratique par imagerie motrice induit une amélioration de la performance en agissant sur la préparation et la planification motrice, plutôt que sur l'exécution en soi.

Functional Reorganization Associated with Motor Sequence Learning using
Mental Practice with Motor Imagery

Philip L. Jackson^{†*}, Martin F. Lafleur^{†*}, Francine Malouin^{†*}, Carol L. Richards^{†*}, and Julien
Doyon^{#§*}

[†] Department of Psychology, [†] Department of Rehabilitation, Laval University, and

^{*3} Rehabilitation and Social Integration Research Centre, Quebec, Canada;

[§] McConnell Brain Imaging Centre, McGill University, and

[#] Department of Psychology, University of Montreal, Montreal, Canada

Running Head : Functional Reorganization after Mental Practice

Inquiries addressed to:

Julien Doyon, Ph.D.

Psychology Department

University of Montreal

C.P. 6128, Succ. Centre-ville

Montreal (Quebec)

Canada, H3C 3J7

Phone: 1-514-343-6502

Fax: 1-514-343-5787

E-mail: julien.doyon@umontreal.ca

Abstract

The goal of the present study was to examine, via positron emission tomography, the functional changes associated with the learning of a sequence of foot movements through mental practice with motor imagery (MI). Following intensive MI training over several days, which led to a significant improvement in performance, healthy subjects showed an increase in activity restricted to the medial aspect of the orbito-frontal cortex (OFC), and a decrease in the cerebellum. These main results are largely consistent with those found in a previous study of sequence learning performed in our laboratory after physical practice of the same task (Lafleur et al., *NeuroImage* 2002). One important difference in the results of this study is that no significant changes were observed in the inferior parietal lobule and in the striatum, supporting the hypothesis that mental practice with MI, at least initially, improves performance by acting on motor preparation and anticipation. Further analyses showed a positive correlation between the blood flow increase in the OFC and the percentage of improvement on the foot sequence task. Moreover, the increased involvement of the medial OFC revealed a modality specific anatomo-functional organization, as imagination of the sequential task after MI practice activated a more posterior region than its execution. The role of this cortical region in reward-related learning is proposed in order to explain its key contribution to motor sequence learning during mental practice. The results support the notion that this type of training acts on the preparation and anticipation of movements rather than on its execution.

Key Words: Motor learning, mental practice, orbito-frontal cortex, human, positron emission tomography

Introduction

Motor imagery (MI) is defined as an active process during which the representation of a specific action is internally reproduced within working memory, without any corresponding motor output (Decety & Grèzes, 1999). An increasing number of investigations have recently studied the neurophysiological correlates of this process and have aimed at clarifying the relationship between executed and imagined movements. Part of this effort stems from a need to explain the underlying mechanisms by which mental practice (MP) with MI improves the learning of motor skills (Jackson, Lafleur, Malouin, Richards, & Doyon., 2001). Indeed, results from sport psychology and skill-learning studies show that MP with MI improves subjects' performance when compared to no-practice control conditions, albeit to a lesser extent than physical practice alone (Driskell, Copper & Moran, 1994; Feltz & Landers, 1983). These findings suggest that MP with MI can be effective at improving the learning of motor skills. However, the neural substrate mediating the beneficial effects of MI training remains unknown.

In one of the rare brain mapping studies designed to examine the effect of MI practice on motor learning, Pascual-Leone and colleagues (1995) showed, through transcranial magnetic stimulation, that representational maps in the contralateral primary motor cortex for long finger flexor and extensor muscles expand after learning a one-handed piano exercise with either physical or MI practice. Such a finding suggests that mental training with MI produces representational cortical changes comparable to those elicited through physical practice. Thus, based on these results and the growing body of evidence showing a neurophysiological similarity between executed and imagined movements, we have recently proposed that changes in performance on motor skill learning tasks following mental practice using motor imagery would be associated with a functional cerebral reorganization similar to that reported after physical practice (Jackson et al., 2001).

As a first step to test this hypothesis, Lafleur and colleagues (2002) in our laboratory measured, through positron emission tomography (PET), the dynamic changes in cerebral activity before and after physical practice of an explicitly known sequence of foot movements. Changes in regional Cerebral Blood Flow (rCBF) associated with physical execution of the sequence early in the learning process were observed bilaterally in the dorsal premotor cortex and cerebellum, as well as in the left inferior parietal lobule. After training however, most of these brain regions were no longer significantly activated, suggesting that they were critical for establishing the cognitive strategies and motor routines involved in executing sequential foot movements. In contrast, after practice, an increased level of activity was seen bilaterally in the medial orbitofrontal cortex and striatum, as well as in the left rostral portion of the anterior cingulate and a different region of the inferior parietal lobule, suggesting that these structures play an important role in subsequent stages of motor learning. Finally, and most importantly, a similar pattern of dynamic changes was observed during acquisition of a motor sequence through physical practice whether the movements were executed or imagined, suggesting that both modalities can reflect the cerebral plasticity occurring during the learning of this skilled behavior.

In this study, we sought to measure cerebral functional changes associated with the learning observed after intensive training of the same sequential motor skill, but this time using *MI practice* instead of physical practice. It was predicted MP with MI, like physical practice, would lead to cerebral reorganization in a network of structures that involves both the cortico-striato-thalamo-cortical and cortico-cerebello-thalamo-cortical loops (see Doyon and Ungerleider, 2002). More specifically, we expected learning-related increases in rCBF in the inferior parietal lobule, anterior cingulate, striatum and medial orbitofrontal region. We also expected a significant decrease of activity in the cerebellum after practice.

Methods

Subjects

Nine right-handed and right-footed healthy subjects (5 women, 4 men; mean age = 26 years, SD = 3.9) took part in this study. The protocol was approved by the Ethics Committee of the Montreal Neurological Institute, and all subjects gave informed written consent before participating.

Material and Procedure

Foot Sequence Task

The apparatus consisted of a pedal that allowed free upward (dorsiflexion) and downward (plantarflexion) single-joint movements of the left ankle (see Lafleur et al., 2002, for a more detailed description of the task). Subjects performed the task in a supine position with their eyes closed. They heard two different auditory signals through a speaker and were asked either to execute or to imagine, as quickly and accurately as possible, a dorsiflexion in response to a high-pitched sound (2000 Hz) or a plantarflexion in response to a low-pitched sound (100 Hz). A trial began when one of the sounds was heard and ended when the subject's foot reached the target position. The trials were presented with a fixed inter-stimulus interval (ISI) of 2000 ms. During conditions involving the imagination of movements, subjects were asked to imagine that their foot reached the target position following each sound using the first-person perspective (i.e., as if they were doing the action themselves). Note that only response times in millisecond (ms) for every foot movement were used as the dependant measure, because subjects made very few errors overall (on average 5%), and the number of errors could not be obtained for comparison purposes in the imagined conditions.

Subjects participated in two scanning sessions (Session 1: Early Learning; Session 2: Late Learning). Before scanning began in Session 1, subjects completed one block of 20 random trials in both physical and MI conditions in order to become familiar with the

task. Subsequently, a 10-element sequence of dorsiflexion (D) and plantarflexion (P) movements (sequence = D-D-P-D-P-P-D-P-D-P) was explicitly taught to the subjects until they were able to reproduce it correctly three times in a row, thus demonstrating declarative knowledge of the sequence.

Scanning Conditions

Each subject underwent a total of ten 60-second scans over the two sessions occurring, on average, 7.3 days (SD = 1.3) apart. The scans for both physically executed and imagined conditions were externally paced by auditory signals at a constant rate of 0.5 Hz, so that the number of responses made during each scan (i.e., 40 trials per scan) was the same for each participant. The scans consisted of five experimental conditions that were repeated during each PET session following the same randomized order. These were: 1) *Sequence Execution*: In this condition, subjects were asked to execute one block of 40 trials following the sequence learned prior to scanning (i.e., 4 times the 10-element sequence without any demarcation between the end of one sequence and the beginning of the next); 2) *Sequence Imagination*: Subjects were required to imagine the same sequence of movements using the first person-perspective, and again, the sequence was repeated four times; 3) *Random Execution*: Subjects were asked to complete one block of 40 foot movements according to the target sounds presented in a random order; 4) *Random Imagination*: Subjects imagined that they were performing foot movements according to the sounds presented in a random order; 5) *Perceptual Control*: In this condition, subjects heard high- and low-pitched sounds that were presented in a random order and were asked to pay close attention to the auditory signals. They were instructed, however, to refrain from producing or imagining any movement.

A portable two-way electromyograph (Pathway MR-20; The Protheus Group) was used to record surface EMG activity over two muscles of the left leg: the *tibialis anterior* and the *soleus*. EMG recordings were obtained during each scan, and during a 60-second rest periods before each scan for comparison purposes (baseline).

In order to measure the subjects' performance in the MI conditions, they were instructed to complete two blocks of four consecutive sequences at the end of each scanning session. Each block was timed with a stop-watch by the principal investigator. Subjects had to start imagining the sequences at the signal of the investigator, and were asked to say "stop" when they had finished imagining the four sequences.

Mental Practice

Between the two PET scanning sessions, subjects were asked to practice the sequence mentally using MI over five training periods. Training was carried out at home in a supine position and monitored by the principal investigator via telephone calls to insure compliance. In each training period, subjects completed 75 blocks of trials in the imagined condition and their performance was assessed using the method described above. In order to reduce mental fatigue, frequent pauses were offered and taken as required by the subjects. Every ten blocks, the experimenter inquired, using five-point ratings scales, about the level of vividness and kinesthetic sensation triggered by the motor imagery. In total, each subject repeated the sequence mentally 1500 times. Note that a similar experimental design was piloted without the PET scanning procedure in order to insure that the amount of training was sufficient to produce behavioral changes (Jackson et al., unpublished observations).

Imaging Data Acquisition & Analysis

PET scans were obtained with a CTI/Siemens HR+ 63-slice tomograph operating in a three-dimensional acquisition mode, at an intrinsic resolution of 4.2 mm x 4.2 mm x 4.0 mm (see Lafleur et al., 2002, for a more detailed description of the PET methodology). The relative distribution of rCBF was measured using the water bolus H₂O¹⁵ methodology. A high-resolution MRI study was also acquired for each subject, using a Philips Gyroscan 1.5T with a T1-weighted fast field echo sequence, to align data

sets stereotactically for within- and between-subject averaging of the functional data obtained with PET. The CBF images were reconstructed with a 14-mm Hanning filter, normalized, coregistered with the individual MRIs and transformed into stereotaxic space (Talairach & Tournoux, 1988) by means of an automated feature-matching algorithm (Collins, Neelin, Peters, & Evans, 1994). The significance of a given CBF activation was assessed by application of an intensity threshold to the t -statistic images based on 3-D Gaussian random field theory (Worsley, Evans, Marrett, & Neelin, 1992). An exploratory search was performed including all peaks within the gray matter volume of 600 cm³ using $t \geq 4.5$ as the significance threshold (corrected $p < 0.05$). The thresholds for peaks located in cerebral structures, for which *a priori* hypotheses had been formulated based on Lafleur et al. (2002), were set according to the estimated volumes of each region (c.f., Worsley et al., 1996), and thus each t -value corresponded to a corrected probability of $p < 0.05$. The cut-off values were: 3.1 for the medial OFC, 3.2 for the caudate nucleus and the putamen, 3.5 for the cingulate region, 3.6 for the medial frontal gyrus, 3.6 for the inferior parietal lobule, and 4.0 for the whole cerebellum.

Results

Behavioral Measures

Figure 1a shows the average response time in ms for all subjects in the Random Execution and the Sequence Execution conditions both before (Early Learning) and after mental practice (Late Learning). A 2 X 2 (Condition X Session) analysis of variance (ANOVA) with repeated measures revealed a significant effect of Condition ($F(1,8) = 10.60, p < 0.05$), suggesting that subjects were, on average, faster in the Sequence than in the Random conditions. However, the ANOVA did not reveal any significant effect of Session ($F(1,8) = 2.89, p > 0.05$), or Condition X Session interaction ($F(1,8) < 1, p > 0.05$). Nevertheless, because we had specific *a priori* hypotheses based on previous experiments, we used planned t -tests to examine further differences between conditions. Results of the contrast between the Sequence conditions in the Early Learning and Late Learning sessions failed to reach significance ($t(8) = 1.60, p = 0.15$), even though the

average performance improved from 486 ± 61 ms to 436 ± 54 ms, and 7 out of 9 subjects decreased their average response time. However, contrast between the subjects' performance in the Sequence Execution and the Random Execution conditions in Session 2 (Late Learning) reached the level of significance ($t(8) = -2.59, p < 0.05$), demonstrating that they had learned the motor sequence after MP with MI.

Improvement in performance in the imagined condition was assessed by comparing the average time to imagine one block of the foot sequence task in the two scanning sessions (Figure 1b). The time taken to imagine the sequence dropped significantly from 40.0 to 30.1 seconds ($t(8) = 2.60, p < 0.05$), suggesting that the subjects learned to imagine the sequence faster with practice.

EMG Measures

Multiple Bonferroni *t*-tests comparing the level of muscle activity measured during the Sequence Imagination, Random Imagination, and Perceptual Control conditions, with that obtained during the baseline period prior to each scan, did not yield any significant difference ($p > 0.0167$). Therefore, the pattern of cerebral activation observed in the MI and perceptual conditions cannot be attributed to leg movements or contraction of the ankle muscles during scanning.

Cerebral Blood Flow

In order to assess the effect of MI practice on cerebral functional reorganization, the level of rCBF for each sequence conditions (Execution, Imagination) in the Early Learning session was subtracted from its corresponding condition in the Late Learning session (Session 2 – Session 1). The results of these subtractions, i.e., relative rCBF peaks and their corresponding coordinates based on stereotaxic human atlases (Talairach & Tournoux, 1988; Schmahmann, Doyon, Toga, Petrides, & Evans, 2000) are presented in Table 1. As expected, these analyses revealed significant activations in the right medial

orbitofrontal cortex in both Sequence Execution (Figure 2a) and Sequence Imagination conditions (Figure 2b). Significant activity at this phase of learning was also observed in the frontal pole during the Sequence Imagination and the Random Imagination conditions (not shown).

Additional analyses first showed that, when the Random Execution condition in the Late Learning session was subtracted from the Sequence Execution in the same session, a single peak was found again in the right medial OFC ($x=1, y=39, z=-23, t=3.1$), further suggesting that the activity in this region was specific to the learning of the motor sequence per se (Figure 2c). Note that a subtraction involving the same conditions in the Early Learning session did not reveal significant activity in this region. Second, when between-session differences in rCBF in the Sequence Execution condition were correlated with the subjects' percent increase in performance at executing the sequence (Figure 2d), the only significant peak was observed within the right medial OFC ($x=3, y=18, z=-22, t=3.5$). The latter finding again suggest that activity in this region is closely related to the learning of the foot-sequence task.

Finally, in order to examine the neural systems involved in the foot-sequence task prior to mental practice of the task, activity elicited by the execution and imagination conditions in the Late Learning session was subtracted from that found for the corresponding conditions in the Early Learning session (see Table 2). These analyses yielded peaks of activity in the cerebellum (lobules IV-V) in the Sequence Executed (Figure 2e) and Random Executed conditions, as well as in the anterior cingulum in the Sequence Imagination condition. Note that the cerebellum was also found to be more activated in the Sequence Imagination condition, although this peak did not reach the conservative level of significance that was set for this structure (Figure 2f). Finally, the subtraction between the two Perceptual conditions did not yield any significant difference, attesting to the inter-session reliability of the PET data.

Insert Table 1 about here

Discussion

The behavioral results of the present study confirmed that MP with MI of a novel foot-sequence task can improve motor performance. Indeed, the observed reduction in response time, which was specific to the practiced sequence, strongly suggests that learning of the sequence of foot movements occurred in addition to a non-specific improvement to use the apparatus (i.e., random condition). Moreover, the parallel improvement in performance for the imagination of the sequence supports again the notion that overt and covert performance of a skill are closely related (e.g., Decety & Michel, 1989; Papaxanthis, Schieppati, Gentili, & Pozzo, 2002).

As predicted based on Lafleur and colleagues' findings (2002), learning of the foot-sequence task through MP with MI was found to be associated with specific functional cerebral reorganization in the right medial OFC. Direct comparisons of the cerebral blood flow before and after mental practice showed that this frontal region was significantly more activated during both the execution and imagination of the sequence after practice. Comparison of the Sequence and the Random Execution conditions after MI practice also revealed a significant peak of activation in the right medial OFC, further supporting the notion that this area is involved in the learning of the sequence of foot movements, and that its contribution is not restricted to the associative learning between the auditory stimuli and the required response. Finally, the robustness of this finding was also supported by a regression analysis, which showed a positive correlation between the increase in cerebral blood flow within the right medial OFC and the subjects' increase in performance on the task. Altogether, these findings strongly suggest that this region of the

frontal lobes plays a critical role in the learning of a specific sequence of foot movements through MP with MI.

The latter activations of the medial OFC are consistent with the results of two recent experiments in our laboratory, which demonstrated that this region contributes to the acquisition of sequential skills, either after physical practice of a sequence of foot-movements (Lafleur et al., 2002), or in relation to the learning of a temporal motor sequence in which synchronization (timing) was an essential component of the task (Penhune & Doyon, 2002). The reasons why activations in the OFC were repeatedly observed in these experiments may be two-fold. First, in each of these studies, subjects were tested using motor tasks in which the sequence of movements was paced through external cues. They were required to learn to respond to a known series of stimuli that were presented at fixed intervals, although the modality through which stimuli were presented or the mode of practice differed greatly between experiments. Second, and more importantly, the OFC activation may be related to the fact that the different sequences were known explicitly by the subjects prior to practice. Although the explicit knowledge of the sequence did not change over time, it is possible that the expectancy for upcoming trials increased through training, thereby improving the efficiency with which the known sequence of movements was associated with a specific and repeated pattern of motor responses.

But why is the OFC so important for learning an explicitly known sequence of movements? The posterior OFC, which shares important neuroanatomical connections with the enthorinal cortex, and the anterior OFC, which connects with the dorso-lateral prefrontal cortex and the anterior cingulate (Fuster, 1997; Goldman-Rakic, 1987), have been shown to be associated with a variety of functions related to decision-making (e.g., Bechara, Damasio, & Damasio, 2000; Elliott, Dolan, & Frith, 2000). While the lateral OFC is known to be involved in response inhibition, it has been suggested that the medial OFC is more important in “making associations between stimuli and correct or rewarded

responses” (Elliott, et al., 2000). In a recent review of several neuroimaging studies, Elliott and colleagues (2000) have suggested that the medial OFC is critical for selecting stimuli and/or responses based on their reward value. They further proposed that the reward value of a response could be related to its familiarity or rightness, hence broadening the meaning of “reward” traditionally associated with physiological and psychological incentives. Such an interpretation of the role of the medial OFC is compatible with our findings, and would suggest that this region is involved in sequential motor learning through a similar reward-related mechanism. Interestingly, our results also suggest that the contribution of this region during motor skill learning would not only be solicited through physical practice, but through MP with MI as well. The latter notion is consistent with recent interpretations by Decety and collaborators (1994) who proposed that MI is related to motor preparation (i.e., the cognitive stage of motor control), and by Pascual-Leone and colleagues (1995) who have suggested that mental practice with MI helps to prime the system for future motor responses.

Although both the execution and imagination of the sequence after MI practice solicited regions of the medial OFC, it is interesting to note that the peaks of activity in these two conditions differed slightly in terms of their localization (see Figure 3a). Following MP, the execution of the sequence of movements was associated with increased activity in Area 14 (Petrides & Pandya, 1994), while its imagination was restricted to a more posterior regions (Area 25; Petrides & Pandya, 1994). Although still conjectural, such a dissociation within the orbitofrontal region could parallel the distinction reported previously between the SMA and pre-SMA, which have shown to be involved in the physical execution and imagination of movements, respectively (e.g., Stephan et al., 1995).

Comparison of the Sequence imagination condition before and after MP with MI revealed increased activity in the left frontal polar region (BA10) (note that a similar peak was also observed in the Random imagination condition, but did not reach the level of

significance). This change of activity appears to be specific to the imagination condition, because comparison of the Sequence execution condition in the two learning phases failed to show any change of CBF in this cortical region. Moreover, this change of activity in Area B10 also seems to be specific to the use of MP with MI, as no significant peak has been found in this region after physical practice of the FST (Lafleur et al., 2002). These findings are in agreement with other works, which have demonstrated that this cortical area plays a role in the maintenance of an intention (Burgess, Quayle, & Frith, 2001; Okuda et al., 1998), and in reward-related decision making (Rogers et al., 1999), two processes elicited during the present foot sequence task.

Contrary to our predictions, however, no significant changes in cerebral activity were found within the striatum after MP with MI. Even though the striatum, and the putamen in particular, have often been shown to be involved in motor sequence learning (e.g., Doyon, Owen, Petrides, Sziklas, & Evans, 1996; Doyon et al., 2002; Lafleur et al., 2002, see Doyon, 1997, Doyon & Ungerleider, 2002, for reviews), the failure to observe significant blood flow changes in this structure following MP could be related to differences in the learning stages attained by the subjects (i.e., the degree of expertise on a task). Another possible explanation for the lack of activation in the striatum may be that the cerebral reorganization observed after MI practice is restricted to motor preparation and anticipation, rather than to the execution of a motor skill *per se*.

As expected, comparison of the pattern of activation before and after MI practice revealed that the right medial cerebellum (lobule IV) was more activated at the beginning than in the late phase of learning in both Random and Sequence Execution conditions (see Table 2). A similar increase was observed in the Sequence Execution and Sequence Imagination conditions (see Figure 2e and 2f, and Figure 3b), except that the peak for the Sequence Imagination condition did not reach our conservative level of significance). Together, these results support the notion that the cerebellum is important in the early stages of the acquisition process for building new motor routines (e.g., Doyon & Ungerleider, 2002),

even when the practice is mental in nature, but that its contribution becomes less important as subjects reach some level of automatization on the motor sequence learning task.

Finally, another significant peak of activation was found in the left anterior cingulate cortex when the level of activity during the Sequence imagination condition in Session 2 was subtracted from that in Session 1. This finding is consistent with those of other experiments involving MI and the observation of actions (e.g., Decety et al., 1994), and suggests that this structure also plays a major role in the early stages of acquiring movement representations through MP with MI.

Conclusion

Our results provide the first evidence that learning of a motor sequence through MP with MI elicits, initially, functional changes in the cortico-cerebellar system, but that after extended practice, the representation of such a skill is dependent upon the integrity of the medial orbito-frontal cortex, a region known to be involved in reward-related learning. These findings, together with the absence of any change of activity in the striatum and the premotor cortex following extended mental practice, suggest that this form of training acts more on the preparation/anticipation of movements involved in a motor sequence, than on the execution of a new skilled behavior *per se*. Such results also add to the arguments in favor of the use of MP with MI in neurologic rehabilitation, where many authors (e.g., Decety, 1993; Jackson et al., 2001; Richardson, 1964; Vanleeuwen & Inglis, 1998) have foreseen great potential in this training method as a therapeutic tool.

Acknowledgments

We thank the subjects who participated in this study. We also thank Kate Hanratty and Isabelle Deaudelin for their technical assistance. This work was supported by a grant from the National Center for Excellence to JD, FM and CR, a grant from the National Science and Engineering Research Counsel to JD, and a scholarship from the FRSQ/REPAR to PJ. This work served as partial fulfillment towards a Ph.D. degree to PJ.

References

- Bechara, A., Damasio, H., & Damasio, A.R. (2000). Emotion, decision making and the orbitofrontal cortex. *Cerebral Cortex*, *10*, 295-307.
- Burgess, P.W., Quayle, A., & Frith, C.D. (2001). Brain regions involved in prospective memory as determined by positron emission tomography. *Neuropsychologia*, *39*, 545-555.
- Collins, D.L., Neelin, P., Peters, T.M., & Evans, A.C. (1994). Automatic 3D intersubject registration of MR volumetric data in standardized Talairach space. *Journal of Computed Assisted Tomography*, *18*, 192-205.
- Decety, J. (1993). Should motor imagery be used in physiotherapy?: Recent advances in cognitive neurosciences. *Physiotherapy Theory & Practice*, *9*, 193-203.
- Decety, J., & Grèzes, J. (1999). Neural mechanisms subserving the perception of human actions. *Trends in Cognitive Sciences*, *3*, 172-178.
- Decety, J., & Michel, F. (1989). Comparative analysis of actual and mental movement times in two graphic tasks. *Brain & Cognition*, *11*, 87-97.
- Decety, J., Perani, D., Jeannerod, M., Bettinardi, V., Tadary, B., Woods, R., et al. (1994). Mapping motor representation with positron emission tomography. *Nature*, *371*, 600-602.
- Doyon, J. (1997). Skill learning. In J. D. Schmahmann (Ed.), *The cerebellum and cognition: International review of neurobiology*, Vol. 41 (pp. 273-294). New York: Academic Press.
- Doyon, J., Owen, A.M., Petrides, M., Sziklas, V., & Evans, A.C. (1996). Functional anatomy of visuomotor skill learning examined with positron emission tomography. *European Journal of Neuroscience*, *8*, 637-648.
- Doyon, J., Song, A.W., Karni, A., Lalonde, F., Adams, M.M., & Ungerleider, L.G.

- (2002). Experience-dependent changes in cerebellar contributions to motor sequence learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99, 1017-1022.
- Doyon, J., & Ungerleider, L.G. (2002). Functional anatomy of motor skill learning. In L.R. Squire & D. Schacter (Eds.). *Neuropsychology of Memory, Third Edition* (pp. 225-238). Guilford Publications.
- Driskell, J.E., Copper, C., & Moran, A. (1994). Does mental practice enhance performance? *Journal of Applied Psychology*, 79, 481-492.
- Elliott, R., Dolan, R.J., & Frith, C.D. (2000). Dissociable functions in the medial and lateral orbitofrontal cortex: evidence from human neuroimaging studies. *Cerebral Cortex*, 10, 308-317.
- Feltz, D.H., & Landers, D.M. (1983). The effects of mental practice on motor skill learning and performance : a meta-analysis. *Journal of Sports Psychology*, 5, 25-57.
- Fuster, J.M. (1997). *The prefrontal cortex. Anatomy, physiology, and neuropsychology of the frontal lobe* (3rd ed.). New York: Raven.
- Goldman-Rakic, P.S. (1987). Circuitry of primate prefrontal cortex and regulation of behavior by representational memory. In: V.B. Mountcastle V.B. & F. Plum (Eds.), *Handbook of physiology*, 5, (pp. 373-417). Bethesda, MD: American Physiological Society.
- Jackson, P.L., Lafleur, M.F., Malouin, F., Richards, C.L., & Doyon, J. (2001). Potential role of mental practice using motor imagery in neurological rehabilitation. *Archives of Physical Medicine & Rehabilitation*, 82, 1133-1141.
- Lafleur, M.F., Jackson, P.L., Richards, C., Malouin, F., Evans, A., & Doyon, J. (2002). Motor learning produces parallel dynamic functional changes during the execution and imagination of sequential foot movements. *NeuroImage*, 16, 142-157.
- Okuda, J., Fujii, T., Yamadori, A., Kawashima, R., Tsukiura, T., Fukatsu, R., et al. (1998). Participation of the prefrontal cortices in prospective memory: evidence from a PET study in humans. *Neuroscience Letters*, 253, 127-130.

- Papaxanthis, C., Schieppati, M., Gentil, R., & Pozzo, T. (2002). Imagined and actual arm movements have similar durations when performed under different conditions of direction and mass. *Experimental Brain Research*, *143*, 447-452.
- Pascual-Leone, A., Nguyet, D., Cohen, L.G., Brasil-Neto, J.P., Cammarota, A., & Hallett, M. (1995). Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills. *Journal of Neurophysiology*, *74*, 1037-1045.
- Penhune, V., & Doyon, J. (2002). Dynamic cortical and subcortical networks in learning and delayed recall of timed motor sequences. *Journal of Neuroscience*, *22*, 1397-1406.
- Petrides, M., & Pandya, D.N. (1994). In F. Boller, & J. Grafman (Eds). *Handbook of Neuropsychology* (Vol. 9, pp. 17-58). Amsterdam: Elsevier.
- Richardson, A. (1964). Has mental practice any relevance to physiotherapy? *Physiotherapy*, *50*, 148-151.
- Rogers, R.D., Owen, A.M., Middleton, H.C., Williams, E.J., Pickard, J.D., Sahakian, B.J., et al. (1999). Choosing between small, likely rewards and large, unlikely rewards activates inferior and orbital prefrontal cortex. *Journal of Neuroscience*, *20*, 9029-9038.
- Schmahmann, J.D., Doyon, J., Toga, A. W., Petrides, M., & Evans, A.C. (2000). *MRI Atlas of the Human Cerebellum*. San Diego: Academic Press.
- Schnider, A., Treyer, V., & Buck, A. (2000). Selection of currently relevant memories by the human posterior medial orbitofrontal cortex. *Journal of Neurosciences*, *20*, 5880-5884.
- Stephan, K.M., Fink, G.R., Passingham, R.E., Silbersweig, D., Ceballos-Baumann, A.O., Frith, C.D., Frackowiak, R.S. (1995). Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects. *Journal of Neurophysiology*, *73*, 373-386.

Talairach, J., & Tournoux, P. (1988). *Co-Planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain*. New-York: Thieme.

Van Leeuwen, R., & Inglis, J.T. (1998). Mental practice and imagery: a potential role in stroke rehabilitation. *Physical Therapy Review*, 3, 47-52.

Worsley, K.J., Evans, A.C., Marrett, S., & Neelin, P. (1992). A three dimensional statistical analysis for CBF activation studies in human brain. *Journal of Cerebral Blood Flow Metabolism*, 12, 900-918.

Worsley, K.J., Marrett, S., Neelin, P., Vandal, A.C., Friston, K.J., & Evans, A.C. (1996). A unified statistical approach for determining significant signals in images of cerebral activation. *Human Brain Mapping*, 4, 58-73.

Figure Legends

Figure 1: a) Mean response time in milliseconds (ms.) to execute the Random (R) and the Sequence (S) conditions before (Early Learning) and after (Late Learning) intensive motor imagery practice. Subjects showed a significant improvement in performance in the Sequence condition after mental practice, as compared to the Random condition. b) Mean time in seconds (sec.) to complete one block of 4 sequences using motor imagery, before (Early Learning) and after (Late Learning) intensive motor imagery practice. Subjects showed a significant reduction in the time taken to imagine the sequence suggesting that learning was also reflected in the imagined performance.

Figure 2: Merged PET-MRI sections illustrating the dynamic rCBF changes associated with mental practice of the Foot-Sequence Task averaged over the 9 subjects for the following subtractions: a) Sequence Execution-Late Learning minus Sequence Execution-Early Learning, b) Sequence Imagination-Late Learning minus Sequence Imagination-Early Learning, c) Sequence Execution-Late Learning minus Random Execution-Late Learning, d) Sequence Execution-Late learning minus Sequence Execution-Early Learning correlated with the percentage improvement, e) Sequence Execution-Early Learning minus Sequence Execution-Late Learning, and f) Sequence Imagination-Early Learning minus Sequence Imagination-Late Learning. Each subtraction yielded focal changes in blood flow shown as t-statistic images, the range is coded by the color scale (RH, right hemisphere; LH, left hemisphere).

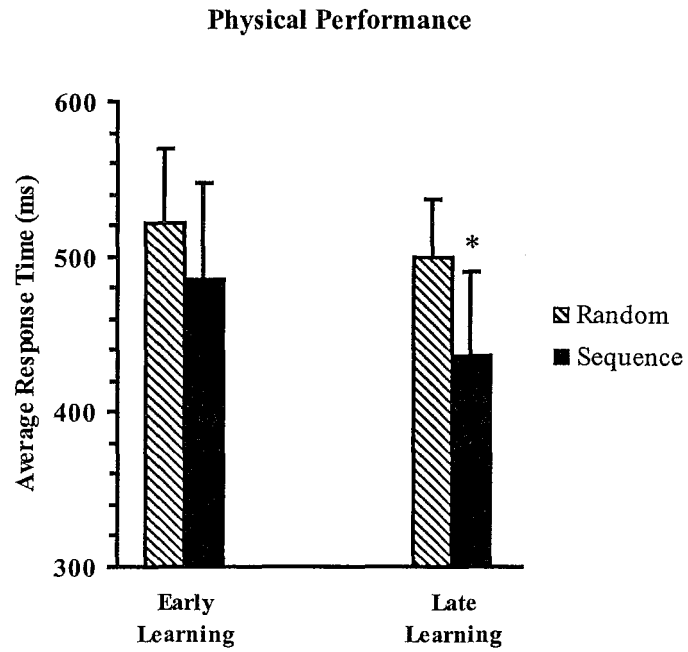
Figure 3: a) Merged PET-MRI sections illustrating the dynamic rCBF changes associated with mental practice of the Foot-Sequence Task for both the Execution (green) and Imagination (red) conditions in a) the medial orbitofrontal region (subtraction Late Learning minus Early Learning), and in b) the cerebellum (subtraction Early Learning minus Late Learning). The images were averaged over the 9 subjects. Each subtraction yielded focal changes in blood flow shown as t-statistic images, the range is coded by the color scale (RH, right hemisphere).

Table 1: Comparison of the Late Learning conditions minus the Early Learning conditions. Activation foci representing peaks of statistically significant increases in normalized CBF. The stereotaxic coordinates are expressed in mm.

Table 2: Comparison of the Early Learning conditions minus the Late Learning conditions. Activation foci representing peaks of statistically significant increases in normalized CBF. The stereotaxic coordinates are expressed in mm

Figure 1

a



b

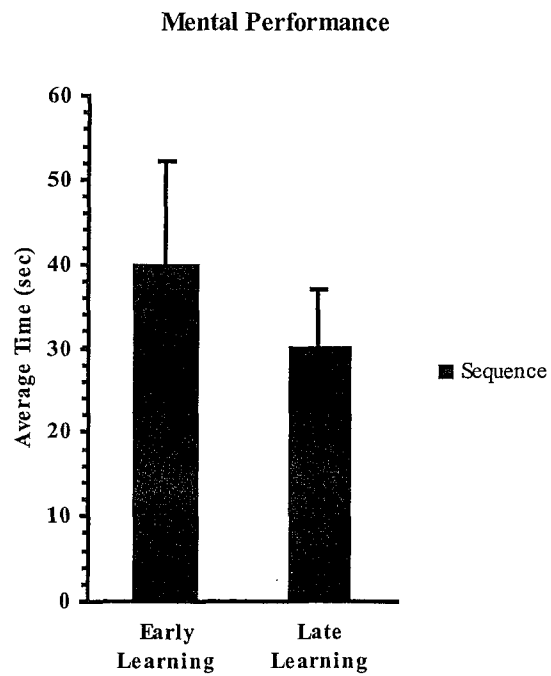
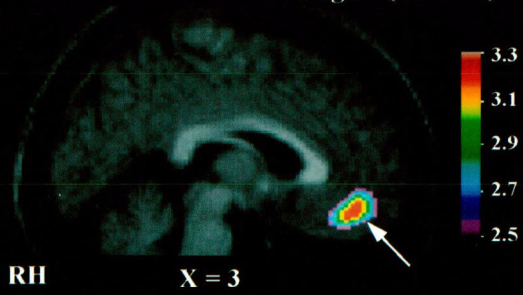


Figure 2

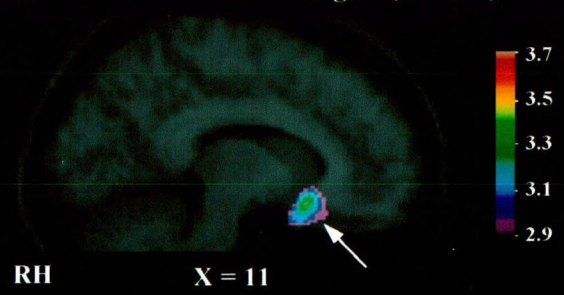
a

Medial Orbito-Frontal
Region (Area 14)



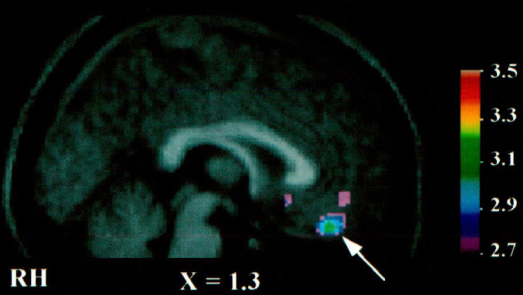
b

Medial Orbito-Frontal
Region (Area 25)



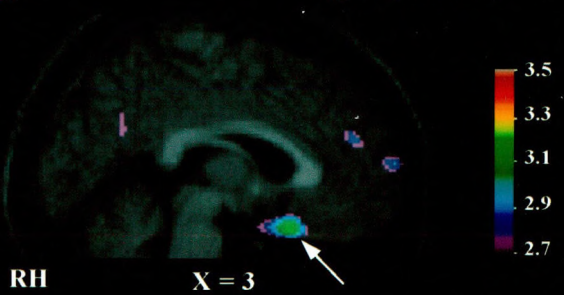
c

Medial Orbito-Frontal
Region (Area 14)



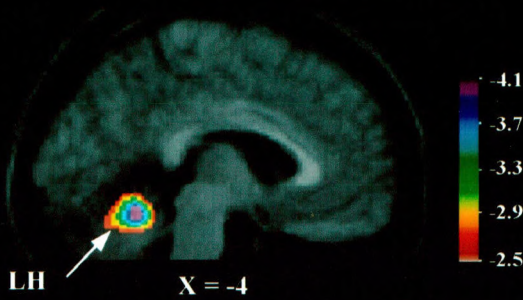
d

Medial Orbito-Frontal
Region (Area 25)



e

Cerebellum (Lobule IV-V)



f

Cerebellum (Lobule IV)

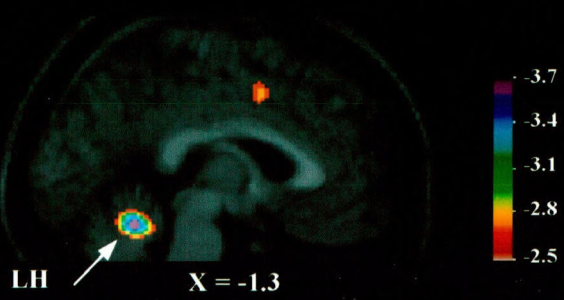
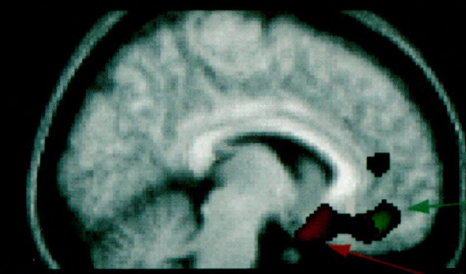
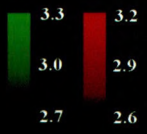


Figure 3

a

Medial Orbito-Frontal Region

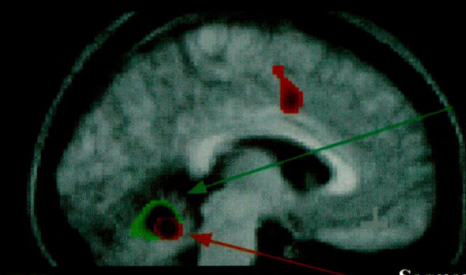
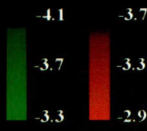


Sequence Execution
(3, 46, -15; $t = 3.3$)

Sequence Imagination
(11, 17, -14; $t = 3.2$)

b

Cerebellum (Lobule IV-V)



Sequence Execution
(-4, -56, -17; $t = -4.1$)

Sequence Imagination
(-1, -54, -20 $t = -3.7$)

Table 1

Comparison of the Late Learning conditions minus the Early Learning conditions

Late Learning - Early Learning					
	L/R	x	y	z	t
SEQUENCE EXECUTED					
Medial Orbitofrontal Region	R	3	46	-15	3.3
SEQUENCE IMAGINED					
Frontal Pole (BA10)	L	-9	67	-6	3.8
Medial Orbitofrontal Region	R	11	17	14	3.2
Medial Orbitofrontal Region	L	-5	12	-23	2.9*
RANDOM IMAGINED					
Frontal Pole (BA10)	L	-16	67	2	3.5*

* did not reach the significance level for this region

Table 2

Comparison of the Early Learning conditions minus the Late Learning conditions

Early Learning - Late Learning					
	L/R	x	y	z	t
SEQUENCE EXECUTED					
Cerebellum (lobules IV-V)	L	-4	-56	-17	4.1
SEQUENCE IMAGINED					
Cerebellum (lobule IV)	L	-1	-54	-20	-3.7*
Anterior Cingulum (24-31)	L	-7	5	39	3.5
RANDOM EXECUTED					
Cerebellum (lobule IV)	L	-1	-54	-20	4.5

* did not reach the significance level for this region

CHAPTER 7

DISCUSSION GÉNÉRALE

DISCUSSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de la présente thèse de doctorat était d'élargir la compréhension des processus comportementaux et neuronaux impliqués dans la pratique mentale d'une habileté par imagerie motrice, et ce dans le but de favoriser l'utilisation de cette méthode d'entraînement pour la réadaptation de personnes ayant perdu de la motricité à la suite d'un trouble neurologique. Cette forme d'entraînement qui est particulièrement populaire auprès des athlètes, n'a encore que très peu été utilisée dans d'autres contextes. Cette thèse réalisée selon une perspective de réadaptation avait donc aussi comme mission le transfert des connaissances vers les milieux cliniques, où la pratique mentale gagnerait à être développée davantage. Cette discussion propose donc une intégration des principaux résultats obtenus lors des études effectuées dans cette thèse, ainsi que des idées qui en découlent directement.

Telle que proposée dans l'article critique paru dans *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* (Jackson et al., 2001), l'une des composantes clé de la pratique mentale est l'imagerie motrice, par laquelle les sujets évoquent non seulement les images mais aussi les sensations associées aux mouvements imaginés. Le modèle présenté dans cet article et en introduction de la thèse suggère que, grâce à l'imagerie motrice, les sujets peuvent intervenir à la fois sur les facteurs conscients (ou déclaratifs) et les facteurs inconscients (ou procéduraux) impliqués dans l'apprentissage d'une habileté. Cette conception de la pratique mentale s'inspire fortement de la littérature sur l'apprentissage d'habiletés motrices, et peut aisément s'appliquer dans un contexte de réadaptation physique. Les résultats obtenus lors des différentes études ont en effet permis de confirmer certaines hypothèses découlant de ce modèle.

Une nouvelle tâche de séquence du pied (la TSP)

L'objectif de la première étude qui était le point de départ d'un ambitieux programme de recherche, était de démontrer si une nouvelle tâche d'habileté motrice séquentielle (soit la tâche de séquences du pied ou TSP) pouvait s'apprendre par des sujets en bonne santé de différents groupes d'âge, et par des sujets démontrant une diminution de leur motricité à la suite d'un accident vasculaire cérébral. Notons que cette tâche impliquait des séquences de mouvements d'une seule articulation du membre inférieur (cheville) afin de réduire les facteurs ou degrés de libertés pouvant être attribués à l'apprentissage de cette habileté. De plus, les mouvements requis, soit des flexions plantaires et dorsales du pied, sont souvent affectés par des troubles neurologiques ce qui augmente la valeur clinique de cette tâche.

Les résultats obtenus avec la TSP indiquent que l'apprentissage démontré par les sujets jeunes et les sujets plus âgés est généralement similaire, c'est-à-dire qu'ils apprennent à un rythme identique, mais que les sujets jeunes sont en moyenne plus rapides dans leur temps de réponse tout au long de l'expérimentation. Il a aussi été démontré, grâce à l'utilisation de séquences différentes, qu'une bonne partie des acquis à la suite de la pratique physique est transférable (généralisable) à une autre séquence possédant la même structure abstraite (par exemple, ABBA et BAAB; c.f., Dominey, Lelekov, Ventre-Dominey, & Jeannerod, 1998). Il n'est donc peut-être pas idéal d'utiliser une deuxième séquence pour mesurer la spécificité de l'apprentissage, puisqu'une partie des acquis découlant de la pratique de la TSP consiste en l'apprentissage de séquences de façon générale (apprendre à apprendre une séquence). Ainsi, des séries de mouvements aléatoires ont été utilisées dans les expériences suivantes afin de départager l'effet de l'apprentissage d'une séquence de mouvements de l'effet de l'apprentissage moteur général requis pour manipuler l'appareil.

Les résultats obtenus avec les patients qui ont une hémiparésie à la suite d'un accident vasculaire cérébral démontrent, quant à eux, qu'il est possible d'apprendre la TSP, même lorsqu'un déficit résiduel affecte les mouvements du membre inférieur. Il est possible

cependant que certains types de lésion interfèrent avec l'apprentissage à cette tâche puisque deux patients n'ont pas démontré d'amélioration significative de leur performance, même après 10 sessions de pratique (1800 répétitions de la séquence!). Il s'avère que ces deux patients avaient des lésions cérébrales à l'hémisphère dominant et que tous deux démontraient des difficultés langagières affectant principalement la production verbale. Les deux autres patients avaient soit une lésion sous-corticale de l'hémisphère dominant, soit une lésion à l'hémisphère non-dominant. Bien qu'il soit prématuré de tirer des conclusions de ces résultats quant à l'interaction entre le site de la lésion et l'apprentissage de la TSP, il est possible d'émettre l'hypothèse que l'intégrité de certaines régions associatives du cortex de l'hémisphère dominant (surtout en région frontale) soit essentielle à l'apprentissage de cette tâche. De récents résultats du laboratoire de Seitz en Allemagne suggèrent en effet que la région de Broca (aire 44 de Broadman) pourrait être importante pour l'imagination de mouvements (Binkofski et al., 2000). Ces auteurs proposent que cette région pourrait être impliquée dans le contrôle des mouvements complexes du membre supérieur au même titre qu'elle l'est pour les mouvements liés à la production du langage.

Mesurer l'apprentissage par pratique mentale: au delà des temps de réponse

De précieuses données obtenues pendant l'élaboration de cette thèse concernent l'utilisation de diverses variables permettant d'objectiver l'apprentissage des sujets. En effet, les études sur l'apprentissage d'habiletés se sont généralement concentrées sur la vitesse d'exécution ou de réaction et la précision des réponses, alors qu'un aspect important soulevé par Willingham (1998) consiste en la réduction de l'effort lorsque les mouvements sont produits. Ainsi, des changements dans la synergie et la cinématique des mouvements peuvent parfois fournir d'importants indices suggérant qu'un apprentissage a eu lieu. En effet, quoique le but d'un programme de réadaptation peut être d'effectuer certains mouvements plus rapidement, il importe aussi, et souvent de manière prioritaire, de les effectuer correctement et de façon sécuritaire. Or, des résultats expérimentaux basés uniquement sur des temps de réponse sont susceptibles de négliger d'autres aspects

d'une habileté qui ont pu s'améliorer. Dans les études de cas effectuées avec les patients ayant subi un accident vasculaire cérébral, l'observation des écarts-types d'une session à l'autre nous démontre que la performance, surtout pour ceux qui ont démontré une diminution de leur temps de réponse, a significativement diminué en terme de variabilité, suggérant que les patients apprennent non seulement à être plus rapides, mais qu'ils deviennent aussi plus constants dans leurs réponses. Cette « régularité » suggère un meilleur contrôle des mouvements permettant un meilleur synchronisme entre les stimuli sonores et les réponses. De tels facteurs souvent dénommés « qualitatifs » ou « cliniques » sont rarement mesurés de façon objective dans des études sur l'apprentissage d'habileté mais reflètent hors de tout doute un apprentissage significatif. Il est possible que la pratique mentale agisse sur des aspects de la performance autres que ceux habituellement mesurés, comme le suggèrent les modestes gains de temps de réponse observés dans cette thèse. Ceci rejoint en quelque sorte les commentaires de certains auteurs qui ont suggéré que le manque de congruité entre plusieurs travaux sur la pratique mentale provient d'une grande différence entre les tâches utilisées (Budney, Murphy, & Woolfolk, 1994; Feltz & Landers, 1983). Spécifions que plusieurs résultats négatifs proviennent probablement d'un choix de variables dépendantes qui sont peu sensibles aux effets de la pratique mentale. L'utilisation de différents paramètres, comme l'isochronisme d'un mouvement utilisé dans les récents travaux de Yaguez et ses collaborateurs (Yaguez et al., 1998; Yaguez, Canavan, Lange, & Homberg, 1999), confirme l'importance d'utiliser des tâches offrant à la fois des mesures dites « objectives » de performance (e.g., temps de réponse) et des indices à valeur « qualitative ». Ces derniers sont souvent significatifs au plan clinique et possèdent ainsi une meilleure validité écologique.

Étude de cas avec la pratique mentale

L'étude de cas présentée au chapitre 4 avait pour but, quant à elle, de tester si la TSP pouvait se pratiquer mentalement par imagerie motrice, et si cette pratique supplémentaire serait bénéfique à la performance d'un sujet ayant été victime d'un accident vasculaire cérébral. Les résultats nous ont montré qu'à la suite d'un apprentissage par pratique

physique sur une période de deux semaines, où le patient semblait avoir atteint un asymptote dans sa performance, ce dernier a continué de s'améliorer dans la troisième semaine lorsqu'il combinait la pratique physique à la pratique mentale par imagerie motrice. Lors de la quatrième semaine, il a ensuite maintenu et même légèrement amélioré sa performance lorsque la pratique mentale était effectuée seule. Ces résultats suggèrent, dans un premier temps, que la pratique mentale combinée à la pratique physique permet d'améliorer la performance à la TSP. Ainsi, comme plusieurs études le suggèrent (voir Driskell et al., 1994; Feltz & Landers, 1983), la combinaison de la pratique physique à la pratique mentale semble supérieure à la pratique mentale utilisée seule. Cependant, l'utilisation de la pratique mentale seule, après qu'un apprentissage ait déjà débuté, peut contribuer à maintenir un niveau de performance optimal. Tel que mentionné à plusieurs reprises dans cette thèse, la pratique mentale ne remplacera jamais la réadaptation physique, mais ajoutée à un programme de réadaptation, elle pourrait s'avérer une méthode de choix pour 1) augmenter le nombre de répétitions des mouvements et ainsi améliorer l'apprentissage et, 2) préserver à long terme les acquis découlant du programme d'entraînement. L'introduction de la pratique mentale en réadaptation représenterait ainsi une phase transitoire entre la pratique physique intense immédiatement après l'apparition du trouble neurologique et l'absence de traitement lors de la réinsertion sociale.

Cette étude de cas a aussi permis de vérifier si une méthode utilisant des livres de bord s'apprête bien à ce type d'entraînement. En effet, lorsque le sujet devait s'entraîner mentalement, il devait aussi noter dans un cahier l'heure à laquelle il l'avait fait, le nombre de répétitions, et aussi la qualité de l'imagerie qu'il avait réussi à évoquer. Quoiqu'un tel outil fournisse un contrôle supplémentaire assurant que le sujet se conforme aux exigences du traitement et qu'il lui donne en même temps un incitatif supplémentaire pour suivre le programme d'entraînement prévu, le livre de bord ne remplace aucunement la motivation et l'encouragement que peut prodiguer le contact humain avec un ou une thérapeute. En effet, un essai infructueux a été conduit avec un groupe de sujets en bonne santé qui devaient pratiquer la TSP sur une période de plusieurs

semaines, sans toutefois retourner régulièrement au laboratoire. Nous avons constaté d'abord par la mortalité expérimentale élevée de ce groupe (30%) et ensuite par la nécessité de rappeler constamment aux sujets de suivre leur programme de pratique mentale, que sans un retour régulier au laboratoire, la pratique mentale requérait un niveau de motivation intense que les livres de bord ne suffisent pas à combler. Ainsi, malgré le potentiel de prise en charge du traitement que semble offrir la pratique mentale, il est peu réaliste de s'attendre à ce que des patients l'utilisent par eux-même à la maison pendant de longues périodes sans fréquents contacts avec leur thérapeute, à moins que cette technique n'ait été introduite et enseignée très tôt en réadaptation.

Motivation et pratique mentale : vouloir est-il pouvoir?

La motivation des sujets a souvent été évoquée au sein des modèles tentant d'expliquer la hausse de performance observée avec la pratique mentale. Paivio (1985) proposait que l'imagerie pouvait améliorer les aspects cognitifs et motivationnels reliés à une habileté. Cette amélioration motivationnelle peut être, selon lui, spécifique (par exemple un but précis), ou général (l'état d'éveil physiologique, i.e., « arousal »; voir aussi Landers, 1980). Van Leeuwen et Inglis (1998) ont récemment précisé ce modèle en proposant que l'imagerie mentale facilite l'apprentissage en agissant sur la motivation, la cognition et l'organisation cérébrale des individus. Bien que cette composante du comportement n'ait pas été mesurée directement, nous discuterons plus loin comment les résultats de l'étude TEP sont compatibles avec l'hypothèse que la pratique mentale augmente la motivation des sujets.

À prime abord, nous pouvons dire que la motivation est un préalable à la pratique mentale puisqu'elle favorise généralement toute forme d'entraînement. Même si la pratique mentale est un processus cognitif, elle requiert néanmoins un niveau d'effort qu'il n'est pas possible de déployer sans un minimum de motivation. Le projet initial de la présente thèse de doctorat proposait des mesures de sentiment d'efficacité personnelle (« self-efficacy ») qui ont du être mises de côté vu l'ampleur et la lourdeur que prenait déjà le

protocole expérimental. L'hypothèse proposée notamment par Bandura (1997), qui suggère que la pratique mentale aide à augmenter la croyance des sujets en leurs moyens, demeure intéressante malgré des résultats équivoques (voir discussion par Budney et al., 1994), et devrait faire l'objet d'études futures, particulièrement dans un contexte de réadaptation où la motivation et les facteurs sociaux jouent un rôle clé (Eslinger, Parkinson, Shamay, 2002). De plus, il est possible que des questionnaires de perception d'efficacité personnelle aident à dépister les sujets et les patients les plus susceptibles de bénéficier de cette forme de traitement. Pour l'instant, les études effectuées dans le cadre de cette thèse nous portent à croire que la hausse de motivation provient du fait que la pratique mentale implique une prise en charge d'une partie du processus d'apprentissage par les sujets. Pour des gens qui ont la volonté de s'améliorer, il est probable que de devenir responsable de certains aspects du processus augmente leur sentiment de contrôle et par le fait même, leur motivation dans le processus de réadaptation. Cet aspect reste à être étudié systématiquement.

Le modèle mis à l'épreuve

Après avoir développé une nouvelle tâche d'apprentissage d'habileté motrice qui sollicite des mouvements du membre inférieur, et après l'avoir validée auprès de diverses populations lors de la première étude, l'hypothèse découlant du modèle proposé en introduction, voulant que l'imagerie motrice soit une composante essentielle à la pratique mentale, a été mise à l'épreuve empiriquement. Les résultats de l'étude présentée dans l'article 3, à la fois innovateurs et intéressants au plan clinique, ont démontré que différentes formes de pratique mentale peuvent contribuer à améliorer l'apprentissage d'une habileté motrice séquentielle. En effet, même si tous les sujets de cette étude avaient une connaissance déclarative de la séquence au tout début de l'apprentissage, les sujets qui se sont répété de nombreuses fois les éléments de la séquence (répétition verbale) ont vu leur performance s'améliorer davantage que les sujets du groupe contrôle. Ce résultat inattendu suggère qu'une fois que des éléments d'une séquence sont connus, il est possible de les rendre encore plus facilement accessibles, facilitant probablement le

synchronisme entre ces derniers et des mouvements bien précis. De plus, et comme prévu, les sujets qui ont utilisé l'imagerie motrice ont mieux appris la séquence de mouvements que ceux du groupe contrôle. Cependant, les résultats obtenus avec la pratique mentale par imagerie motrice et ceux avec la répétition verbale, qui ne diffèrent pas significativement en période d'apprentissage, se distinguent lorsque l'on mesure la rétention des acquis après un délai de plusieurs mois. Ainsi, après une période de 6 à 8 mois sans pratique additionnelle, les sujets qui ont utilisé la répétition verbale et démontré un apprentissage significatif, semblent avoir « oublié » ce qu'ils avaient appris. Les sujets qui ont utilisé l'imagerie motrice, quant à eux, ont conservé une part significative de leur apprentissage. Cette dissociation suggère que, quoiqu'un entraînement par répétition verbale ait une utilité lors de l'apprentissage initial d'une habileté, les bénéfices ainsi obtenus ne semblent pas se consolider à long terme comme c'est le cas avec l'imagerie motrice. Ceci supporte l'hypothèse que la pratique mentale par imagerie motrice agit de manière plus importante que la répétition verbale sur les aspects implicites (procéduraux et non-conscients) reliés à une habileté puisque ceux-ci sont généralement résistants au passage du temps.

Cette différence entre deux types d'entraînement mérite aussi quelques considérations quant à l'usage de la pratique mentale dans un contexte de réadaptation. Quoique les résultats de l'Article 3 semblent suggérer que l'imagerie motrice est supérieure à la répétition verbale, cette dernière peut néanmoins s'avérer utile en réadaptation. En effet, le concept d'imagerie motrice est parfois initialement difficile à comprendre pour certains patients tandis qu'une série d'instructions verbales est plus facile à assimiler. Prenons par exemple la tâche de se lever debout d'une chaise, où des instructions verbales très précises comme de ramener ses pieds sous le siège, de distribuer son poids également de chaque côté, de lancer son tronc vers l'avant et de pousser également avec les deux jambes pour se lever debout, peuvent facilement être répétées mentalement à plusieurs reprises pour les rendre en quelque sorte plus automatiques. La répétition verbale pourrait donc servir comme méthode d'initiation pour introduire les patients au concept de pratique mentale et de prise en charge de leur processus de réadaptation, tout en leur

enseignant les aspects conscients et « verbalisables » d'un mouvement. Tel que discuté dans l'Étude 2, le modèle de Annett propose un lien étroit entre les mouvements et la verbalisation (Action-Language Bridge) qui pourrait être mis à contribution par la répétition verbale. Bandura (1997, p.376) suggère que « *There is little value to cognitive enactment (mental practice) in the early phase of learning before an adequate conception of the skilled activity has been formed* », et c'est justement à quoi pourrait servir la répétition verbale: de bien connaître tous les différents mouvements requis dans une habileté. Une fois que les mouvements sont bien connus, l'imagerie motrice aiderait à poursuivre l'apprentissage et à maintenir les acquis en les "procéduralisant", soit en intégrant les composantes motrices implicites et la connaissance explicite des mouvements. Un autre avantage d'utiliser la répétition verbale au tout début d'un entraînement est qu'elle requiert beaucoup moins de temps et d'effort mental que l'imagerie motrice pour un nombre équivalent de répétitions. Encore une fois, en introduisant des exercices moins exigeants en début de réadaptation on augmente les chances d'intéresser les patients à leur processus de réadaptation et on optimise de cette façon leur motivation à utiliser une méthode avant-gardiste comme la pratique mentale. L'imagerie motrice devrait néanmoins être introduite relativement tôt pour éviter que les sujets demeurent « accrochés » sur les étiquettes verbales et qu'ils arrivent rapidement à évoquer les aspects kinesthésiques des mouvements, qui selon notre étude sur la rétention, sont les plus profitables à long terme.

Performance imaginée et chronométrie

De façon parallèle à l'étude de l'effet de la pratique mentale sur la performance physique des sujets, nous nous sommes aussi intéressés à la capacité d'imagination d'une habileté, et aux propriétés chronométriques des mouvements imaginés. Plusieurs études ont montré dans un premier temps, que les mouvements imaginés tout comme les mouvements exécutés, sont régis par la loi de Fitts (Fitts, 1954; par exemple, Decety et Jeannerod, 1996; Papaxanthis, Schieppati, Gentili, & Pozzo, 2002). Cette loi veut que le temps requis pour exécuter un mouvement soit directement corrélé avec le degré de difficulté de ce

mouvement (distance, précision, etc.). Nous n'avons pas testé directement cette hypothèse mais certaines données obtenues avec nos mesures pré-expérimentales comme le *Imaginary Distance Index* (voir Article 3) confirment cette tendance. Un autre aspect de la chronométrie des mouvements qui a été mentionné dans la littérature pour évoquer la similarité entre les mouvements imaginés et les mouvements exécutés est la correspondance entre le temps requis pour compléter ces deux types de mouvements. Selon certains auteurs, cette correspondance serait parfaite, c'est-à-dire, que si l'imagerie motrice est effectuée correctement, le temps pour imaginer un mouvement devrait être exactement le même que celui pour l'exécuter physiquement. Nos résultats supportent l'hypothèse que ces deux types de mouvements sont intimement reliés sans toutefois être temporellement identiques. En effet, les sujets qui ont utilisé l'imagerie motrice se sont améliorés davantage que les sujets du groupe contrôle sur le plan des mouvements imaginés, ce qui suggère que l'amélioration de la performance physique et mentale sont intimement reliés (voir chapitre 4). L'analyse détaillée des temps d'imagination des sujets a cependant conduit vers des résultats jamais soupçonnés auparavant. Quoique la correspondance entre le temps imaginé et le temps d'exécution des mouvements soit généralement observée sur de grands échantillons de sujets, il existe des caractéristiques individuelles ou des styles d'imagination propres à chaque individu qui ne sont pas mis en évidence lorsqu'on utilise des moyennes de groupes. Lorsque les temps d'imagination et d'exécution ont été comparés directement pour chaque sujet de l'étude dans l'Article 3, il est apparu que certains sujets imaginaient plus rapidement les mouvements qu'ils ne les exécutaient (jusqu'à 37% plus rapide en imaginant), alors que d'autres montraient le patron de résultats inverse (jusqu'à 62% moins rapide en imaginant). De plus, cette tendance pour chacun des sujets semblait constante tout au long de l'expérimentation, et ne semblait pas être influencée par la pratique ou par l'apprentissage de l'habileté. Par contre, si l'on compare la vitesse imaginée et la vitesse exécutée en moyenne pour tout le groupe, la différence n'est que de 5% en faveur des mouvements exécutés. La portée clinique d'un tel résultat est que la congruité entre l'imagination et l'exécution d'un mouvement n'est pas nécessairement un résultat à rechercher chez un individu en bonne santé pour s'assurer que l'imagination est faite adéquatement. Chaque sujet imagine les

mouvements à son rythme et aucune donnée jusqu'à présent ne nous permet d'identifier quel rythme devrait être adopté. Ce résultat identifie néanmoins un facteur individuel qu'il serait important de contrôler ou du moins de contre-balancer lors d'études futures impliquant des groupes de sujets qui s'imaginent des mouvements. On ignore actuellement si de tels résultats sont aussi observés chez des patients porteurs de lésions cérébrales, mais de récents travaux suggèrent que le ratio imagination/exécution diffère selon que les mouvements impliquent un membre affecté ou un membre non-affecté par la lésion (Malouin et al., en préparation).

Les résultats obtenus avec le Questionnaire d'Imagerie Kinesthésique et Visuelle supportent aussi la notion que les sujets utilisent une représentation interne des mouvements qui leur est propre et qui est relativement stable dans le temps. En effet, même après plusieurs semaines d'entraînement avec l'imagerie motrice, les sujets n'ont pas changé leur perception de leurs capacités à se visualiser et à ressentir les mouvements. Comme les données le démontrent, c'est la performance lors de l'exécution et l'imagination des mouvements qui s'améliore et non la qualité du processus d'imagerie.

La pratique mentale et la réorganisation cérébrale : l'intention vaut-elle le fait?

Un des objectifs de la thèse, qui visait une meilleure compréhension de la plasticité cérébrale pouvant être observée après la pratique mentale, a aussi conduit à des résultats originaux et prometteurs. Nous avons employé un protocole simple, vérifié au préalable à l'aide d'une étude comportementale (voir Annexe 5), afin de comparer l'organisation cérébrale fonctionnelle avant et après une période de pratique mentale de la TSP. Les sujets ont montré une amélioration significative de leur performance après la pratique mentale qui s'accompagnait d'une augmentation de l'activité cérébrale dans la région médiane du cortex orbito-frontal. Comme nous l'avons présenté dans l'Étude 3, il existe des liens neuroanatomiques entre l'aspect postérieur de la région médiane du cortex orbito-frontal et le cortex enthorinal, suggérant ainsi un lien entre l'apprentissage de la tâche et la récupération ou l'intégration d'information déclarative (Schnider, Treyer, &

Buck, 2000). Puisque l'information déclarative (la séquence de mouvements) ne peut être mieux connue qu'elle ne l'était au début de l'apprentissage, l'augmentation d'activité dans le cortex orbito-frontal pourrait être associée à une meilleure intégration entre cette information et les mouvements devant être produits. En effet cette région cérébrale se trouve en quelque sorte entre les régions enthorinales importantes dans la rétention d'information et les régions du lobe frontal impliquées dans l'intégration motrice (par exemple, le cingulum antérieur). Le rôle attribué au cortex orbito-frontal dans l'apprentissage par récompense (voir Elliott, Dolan, & Frith, 2000) pourrait aussi suggérer que l'amélioration de la performance à la TSP se traduit par une meilleure anticipation, et que le fait d'exécuter la séquence correctement devient de plus en plus renforçant. Conséquemment, cette hausse d'activité dans la région orbito-frontale pourrait être associée à une hausse de motivation que manifestent les sujets lorsqu'ils réussissent la tâche correctement. Cependant, d'autres études sont nécessaires avant de pouvoir généraliser cette hypothèse de la motivation à d'autres habiletés puisque ce résultat pourrait être étroitement relié avec la nature de la tâche.

Tel que mentionné dans l'étude de TEP, l'absence de changement d'activité cérébrale significatif dans les structures traditionnellement associées à la motricité, tels que le striatum, supporte l'hypothèse que la pratique par imagerie motrice induit une amélioration de la performance en agissant initialement sur la préparation et la planification motrice plutôt que sur l'exécution du mouvement en soi. Selon le modèle proposé dans le premier article, nous aurions pu nous attendre à un changement d'organisation dans les structures motrices puisque nous croyons que l'imagerie motrice donne accès aux mêmes patrons moteurs et à des circuits neuronaux très semblables à ceux sollicités par l'exécution du mouvement. Une hypothèse permettant de réconcilier ce résultat serait que lors des phases initiales d'un apprentissage, l'imagerie motrice serve d'abord à consolider l'interaction entre l'information déclarative (la séquence) et les éléments procéduraux reliés aux mouvements, grâce à un mécanisme de récompense semblable à celui proposé par Elliott et collaborateurs (2000). D'ailleurs, notons que ce mécanisme semblait aussi possible avec la répétition verbale comme les résultats de

l'Article 3 le suggèrent. Cette interprétation s'accorde avec les méta-analyses qui montrent que la pratique mentale semble plus efficace pour des sujets novices lorsque la tâche comporte une forte composante cognitive (Driskell, et al., 1994), puisqu'en début d'apprentissage, ce sont les processus déclaratifs qui sont le plus visés par la pratique mentale. Dans des phases avancées d'apprentissage, l'expertise du sujet lui permettrait de recruter avec l'imagerie motrice un patron neuronal s'approchant de plus en plus de celui utilisé dans l'exécution du mouvement. Nous proposons donc l'hypothèse qu'après plusieurs semaines de pratique mentale, nous devrions voir des changements notamment dans le striatum comme il a été démontré après une période de pratique physique à cette même tâche (Lafleur et al., 2002). Donc, après plusieurs semaines, les sujets devenus « experts » développent une meilleure représentation mentale des mouvements et s'approchent ainsi davantage du patron cérébral impliqué dans l'exécution d'une habileté.

Ces résultats ont un impact direct sur l'utilisation de la pratique mentale en réadaptation physique puisqu'ils soulignent l'importance de certains systèmes neuronaux dans ce type d'entraînement, et offrent ainsi un premier indice vers une sélection éclairée des patients qui pourraient bénéficier le plus de la pratique mentale. Certains travaux ont proposé que des régions comme par exemple le lobe pariétal jouerait un rôle clé dans l'imagination d'un mouvement (Sirigu et al, 1996, Decety, Chaminade, Grezes, & Meltzoff, 2002). Il importe à ce stade de mener des études de groupes de patients ayant des lésions cérébrales dans les régions identifiées lors de notre étude TEP, afin de cerner davantage les régions du cerveau impliquées, non seulement dans l'imagination du mouvement, mais aussi et surtout dans l'apprentissage par pratique mentale.

Directions futures

Parmi les questions qui gagneraient à être explorées davantage concernant l'utilisation de la pratique mentale en réadaptation, notons que l'étude de l'interaction entre la pratique physique et la pratique mentale, en utilisant par exemple différents ratios de ces deux formes d'entraînement, permettrait d'identifier les combinaisons offrant le plus de gains

de performance. De plus, il est possible qu'il existe une interaction entre les différentes combinaisons de ces méthodes d'entraînement et le stade d'apprentissage des sujets. La distinction que l'on a fait dans cette thèse entre pratique physique et pratique mentale repose sur la définition que la pratique mentale avec l'imagerie motrice n'impliquent pas de mouvements ou de contractions musculaires. Nous avons d'ailleurs utilisé des mesures électromyographiques pour nous assurer de l'absence de contractions musculaires pendant l'imagerie motrice. Cette définition a été adoptée dans le but de restreindre le processus d'imagerie motrice volontairement à une activité la plus centrale possible, c'est-à-dire qui se limite à une activité cérébrale, excluant l'activité musculaire associée à un mouvement. Cette mesure de contrôle est partagée par la plupart des études sur l'imagerie motrice. Or, il est possible qu'en restreignant l'activité neuronale de telle manière (et même en forçant une inhibition des contractions), nous perdions par la même occasion une partie de l'efficacité de l'imagerie motrice (J. Gauthier, communication verbale). Ainsi, une étude comparant directement l'effet de la pratique mentale avec ou sans contractions musculaires pourrait nous éclairer quand à la meilleure technique à utiliser en réadaptation. Il existe sans doute un continuum entre l'exécution physique d'un mouvement et l'absence totale d'activité périphérique qu'il est possible d'exploiter à différentes étapes d'un processus d'apprentissage.

Un dernier facteur mais non le moindre, qui a été contrôlé lors des études effectuées dans le cadre de cette thèse, mais qui gagnerait à être exploré davantage, est la perspective adoptée par les sujets pendant l'imagerie motrice. Ainsi, nos instructions visaient à solliciter l'imagerie motrice « à la première personne » (i.e., selon une perspective centrée sur le sujet), or il existe des travaux suggérant que l'imagerie effectuée à la troisième personne (i.e., selon une perspective externe où l'on s'imagine soi-même ou quelqu'un d'autre devant nous) peut aussi être bénéfique à l'apprentissage de certaines habiletés (voir discussions par Hall, Schmidt, Durand, & Buckolz, 1994; McLean & Richardson, 1994 ; Murphy, 1994). Nous savons maintenant grâce à de récents travaux de Decety et ses collaborateurs que ces deux perspectives sollicitent des circuits neuronaux généralement semblables mais néanmoins légèrement distincts (Ruby & Decety, 2001).

Une différence qui émerge lorsque l'on compare directement les deux perspectives, est l'implication du lobe pariétal inférieur *droit* lors de l'imagination selon la 3^e personne tandis que la 1^{ère} personne sollicite la même région mais du côté *gauche* du cerveau. Ces résultats suggèrent une spécificité dans le lobe pariétal inférieur qui est latéralisée selon l'agent de nos gestes ou de nos pensées. Donc, l'identification de la lésion d'un patient pourrait aider à déterminer quel type d'imagerie devrait être utilisé.

Un autre résultat intéressant découlant de la comparaison des perspectives (Ruby & Decety, 2001) est l'implication plus importante du cortex somatosensoriel lors de l'imagerie effectuée à la première personne plutôt qu'à la troisième personne. Cette différence a d'importantes implications en réadaptation puisque la stimulation somatosensorielle joue possiblement un rôle clé dans la récupération motrice, comme par exemple la force musculaire, après un accident vasculaire cérébral (Conforto, Kaelin-Lang, & Cohen, 2002). Cette distinction entre une perspective à la première ou à la troisième personne supporte aussi notre choix lors des études de cette thèse. Il semble donc que la perspective à la première personne offre le meilleur potentiel pour que les sujets ressentent le mouvement en plus de le visualiser lorsqu'ils utilisent l'imagerie motrice. Pour faire suite au modèle proposé, il est possible que l'imagerie à la troisième personne soit plus utile en début d'apprentissage afin de bien saisir et visualiser toutes les composantes déclaratives d'une habileté, tandis que la perspective à la première personne permettrait une meilleure consolidation des aspects procéduraux reliés à cette habileté, plus tard dans le processus d'apprentissage. Bien entendu, ces idées demeurent actuellement spéculatives mais pourraient très bien faire l'objet d'hypothèses scientifiques vérifiables.

Conclusion

Cette aventure a commencé par la croyance que la pratique par imagerie motrice pourrait contribuer de façon significative à l'apprentissage d'habiletés et ce dans un contexte de réadaptation physique. Nous avons confirmé les résultats de plusieurs recherches

effectuées surtout en psychologie sportive et ajouté à ceux-ci en montrant que la répétition verbale peut aussi s'avérer efficace lors de l'apprentissage initial d'une habileté motrice. Les nombreux efforts déployés au cours des dernières années ont aussi permis de confirmer que la recherche sur l'utilisation de la pratique mentale en réadaptation aurait tout avantage à procéder par une série d'études de cas, puisqu'il existe de nombreux facteurs susceptibles d'influencer les résultats de la pratique mentale, et que tous ne peuvent être aisément contrôlés ou même identifiés.

Cette thèse se voulait un effort d'une part pour éclaircir les processus comportementaux et physiologiques qui sous-tendent la pratique mentale de mouvements, et d'autre part pour promouvoir une utilisation réfléchie de cette technique en milieu clinique. Plusieurs avenues de recherche demeurent bien évidemment à explorer pour cerner le véritable potentiel de la pratique mentale. Et bien que nous sachions maintenant que l'imagination répétée de mouvements influence l'organisation du cerveau, ce ne sera que grâce aux facultés « productive » et « reproductive » de nombreux chercheurs et cliniciens que l'on pourra cheminer vers une plus grande compréhension du cerveau et de l'esprit humain.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

*Les ouvrages précédés d'une * ne sont pas cités dans le texte*

- Abbruzzese, G., Assini, A., Buccolieri, A., Marchese, R., & Trompetto, C. (1999). Changes of intracortical inhibition during motor imagery in human subjects. *Neuroscience Letters*, 263, 113-116.
- Abbruzzese, G., Morena, M., Spadavecchia, L., & Schieppati, M. (1994). Response of arm flexor muscles to magnetic and electric brain stimulation during shortening and lengthening tasks in man. *Journal of Physiology (London)*, 481, 499-507.
- Abbruzzese, G., Trompetto, C., & Schieppati, M. (1996). The excitability of the human motor cortex increases during execution and mental imagination of sequential but not repetitive finger movements. *Experimental Brain Research*, 111, 465-472.
- Annett, J. (1995). Motor imagery: perception or action? *Neuropsychologia*, 33, 1395-1417.
- Appel, P.R. (1992). Performance enhancement in physical medicine and rehabilitation. *American Journal of Hypnosis*, 35, 11-19.
- *Ashen, A. (1984). ISM: The triple code model for imagery and psychophysiology. *Journal of Mental Imagery*, 8, 15-42.
- *Atienza, F., Balaguer, I., & Garcia-Merita, M.L. (1994). Factor analysis and reliability of the Movement Imagery Questionnaire. *Perceptual Motor Skills*, 78, 1323-1328.
- *Bachevalier, J. (1996). Les systèmes de mémoire et leurs bases neurobiologiques. In M.I. Botez (Ed.), *Neuropsychologie clinique et neurologie du comportement*. (pp. 391-408). Montréal: Masson.
- *Bandura, A. (1977). Self-efficacy: toward a unifying theory of behavioral change. *Psychology Review*, 84, 191-215.
- *Bandura, A. (1986). *Social foundations of thought and action: a social cognitive theory*.

Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

- Bandura, A. (1997). *Self-efficacy: the exercise of control*. New York: Freeman.
- Bechara, A., Damasio, H., & Damasio, A.R. (2000). Emotion, decision making and the orbitofrontal cortex. *Cerebral Cortex*, *10*, 295-307.
- Beisteiner, R., Hollinger, P., Lindinger, G., Lang, W., & Berthoz, A. (1995). Mental representations of movements. Brain potentials associated with imagination of hand movements. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, *96*, 183-193.
- Berthoz, A. (1996). The role of inhibition in the hierarchical gating of executed and imagined movements. *Brain Research Cognitive Brain Research*, *3*, 101-113.
- Betts, G.H. (1909). *The distribution and functions of mental imagery*. New York: Teacher's College, Columbia University.
- Binkofski, F., Amunts, K., Stephan, K.M., Posse, S., Schormann, T., Freund, H.J., et al. (2000). Broca's region subserves imagery of motion: a combined cytoarchitectonic and fMRI study. *Human Brain Mapping*, *11*, 273-285.
- *Bloedel, J.R., Bracha, V., Shimansky, Y., & Milak, M.S. (1996). The role of the cerebellum in the acquisition of complex volitional forelimb movements. In J.R. Bloedel, T.J. Ebner, & S.P. Wise (Eds.), *The acquisition of motor behavior in vertebrates* (pp. 319-341). Cambridge: MIT Press.
- *Bobath, B. (1970). *Adult hemiplegia: evaluation and treatment*. Henneman Medical Books Ltd.
- Bonnet, M., Decety, J., Jeannerod, M., & Requin, J. (1997). Mental simulation of an action modulates the excitability of spinal reflex pathways in man. *Brain Research Cognitive Brain Research*, *5*, 221-228.
- Brashers-Krug, T., Shadmehr, R., & Bizzi, E. (1996). Consolidation in human motor memory. *Nature*, *382*, 252-255.
- *Brunnstrom, S. (1970). *Movement therapy in hemiplegia*. New York Harper and Row Publishers.

- Budney, J.A., Murphy, S.M., & Woolfolk, R.L. (1994). Imagery and motor performance: what do we really know?. In A. A. Sheikh & E. R. Korn (Eds.), *Imagery in sports and physical performance*. (pp 97-120). Amityville, New York: Baywood Publishing Company.
- Burgess, P.W., Quayle, A., & Frith, C.D. (2001). Brain regions involved in prospective memory as determined by positron emission tomography. *Neuropsychologia*, *39*, 545-555.
- *Butters, N., Heindel, W.C., & Salmon, D.P. (1990). Dissociation of implicit and explicit memory in dementia: Neurological implications. *Bulletin of the Psychonomic Society*, *28*, 359-366.
- *Carr, J.H., & Shepherd, R.B. (1985). Investigation of a new motor assessment scale for stroke patients. *Physical Therapy*, *65*, 175-180.
- Cerritelli, B., Maruff, P., Wilson, P., & Currie, J. (2000). The effect of an external load on the force and timing components of mentally represented actions. *Behavioral Brain Research*, *108*, 91-96.
- *Chollet, F., & Weiller, C. (1994). Imaging recovery function following brain injury. *Current Opinion in Neurobiology*, *4*, 226-230.
- Classen, J., Liepert, J., Wise, S.P., Hallett, M., & Cohen, L.G. (1998). Rapid plasticity of human cortical movement representation induced by practice. *Journal of Neurophysiology*, *79*(2), 1117-1123.
- Clegg, B.A., DiGirolamo, G.J., & Keele, S.W. (1998). Sequence learning. *Trends in Cognitive Sciences*, *2*, 275-281.
- *Colebatch, J.G., Deiber, M.-P., Passingham, R.E., Friston, K.J., & Frackowiak, R.S.J. (1991). Regional cerebral blood flow during voluntary arm and hand movements in human subjects. *Journal of Neurophysiology*, *65*, 1392-1401.
- Collins, D.L., Neelin, P., Peters, T.M., & Evans, A.C. (1994). Automatic 3D intersubject registration of MR volumetric data in standardized Talairach space. *Journal of Computed Assisted Tomography*, *18*, 192-205.

- Conforto, A.B., Kaelin-Lang, A., & Cohen, L.G. (2002). Increase in hand muscle strength of stroke patients after somatosensory stimulation. *Annals of Neurology*, *51*, 122-125.
- Corbin, C.B. (1972). Mental practice. In W.P. Morgan (Ed.), *Ergogenic Aids and Muscular Performance*. New York: Academic Press.
- Cornwall, M.W., Bruscatto, M.P., & Barry, S. (1991). Effect of mental practice on isometric muscular strength. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, *13*, 231-234.
- Crovitz, H.F., & Zener, K. (1962). A group-test for assessing hand-and-eye dominance. *American Journal of Psychology*, *73*, 271-276.
- Cunnington, R., Iansek, R., Bradshaw, J.L., & Phillips, J.G. (1996). Movement-related potentials associated with movement preparation and motor imagery. *Experimental Brain Research*, *111*, 429-436.
- Dean, C.M., Richards, C.L., & Malouin, F. (2000). Task-related training improves the performance of locomotor tasks in chronic stroke. A randomized controlled pilot study. *Archives of Physical Medicine & Rehabilitation*, *81*, 409-417.
- Dean, G., & Morris, P.E. (1991). Imagery and spatial ability: when introspective report predict performance. In R. Logie & M. Denis (Eds.). *Mental Images in Human Cognition*. Amsterdam: Elsevier.
- Decety, J. (1993). Should motor imagery be used in physiotherapy?: Recent advances in cognitive neurosciences. *Physiotherapy Theory & Practice*, *9*, 193-203.
- Decety, J. (1996a). Do imagined and executed actions share the same neural substrate? *Brain Research Cognitive Brain Research*, *3*, 87-93.
- Decety, J. (1996b). Neural representations for action. *Reviews in Neuroscience*, *7*, 285-297.
- Decety, J. (1996c). The neurophysiological basis of motor imagery. *Behavioral Brain Research*, *77*, 45-52.

- Decety, J., & Boisson, D. (1990). Effect of brain and spinal cord injuries on motor imagery. *European Archives of Psychiatry & Clinical Neuroscience*, 240, 39-43.
- Decety, J., Chaminade, T., Grèzes J., & Meltzoff A.N. (2002). A PET exploration of the neural mechanisms involved in reciprocal imitation. *NeuroImage*, 15, 265-272.
- Decety, J., & Grèzes, J. (1999). Neural mechanisms subserving the perception of human actions. *Trends in Cognitive Sciences*, 3, 172-178.
- Decety, J., & Jeannerod, M. (1996). Mentally simulated movements in virtual reality: does Fitt's law hold in motor imagery? *Behavioral Brain Research*, 72, 127-134.
- *Decety, J., Jeannerod, M., Durozard, D., & Baverel, G. (1993). Central activation of autonomic effectors during mental simulation of motor actions in man. *Journal of Physiology*, 461, 549-563.
- *Decety, J., Jeannerod, M., Germain, M., & Pastene, J. (1991). Vegetative response during imagined movement is proportional to mental effort. *Behavioral Brain Research*, 42, 1-5.
- Decety, J., Jeannerod, M., & Prablanc, C. (1989). Timing of mentally represented actions. *Behavioral Brain Research*, 34, 35-42.
- Decety, J., & Lindgren, M. (1991). Sensation of effort and duration of mentally executed actions. *Scandinavian Journal of Psychology*, 32, 97-104.
- Decety, J., & Michel, F. (1989). Comparative analysis of actual and mental movement times in two graphic tasks. *Brain & Cognition*, 11, 87-97.
- Decety, J., Perani, D., Jeannerod, M., Bettinardi, V., Tadary, B., Woods, R., et al. (1994). Mapping motor representation with positron emission tomography. *Nature*, 371, 600-602.
- *Decety, J., & Philippon, B. (1988). RCBF variations during a motor and an imagined graphic task in normal volunteers and analysis of the reproducibility with the ¹³³Xe inhalation technique. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 10, 328.

- Decety, J., Philippon, B., & Ingvar, D.H. (1988). rCBF landscapes during motor performance and motor ideation of a graphic gesture. *European Archives of Psychiatry & Neurological Sciences*, 238, 33-38.
- *Decety, J., Sjöholm, H., Ryding, E., Stenberg, G., & Invar, D.H. (1990). The cerebellum participates in mental activity: tomographic measurements of regional cerebral blood flow. *Brain Research*, 535, 313-317.
- Deiber, M.P., Ibanez, V., Honda, M., Sadato, N., Raman, R., & Hallett, M. (1998). Cerebral processes related to visuomotor imagery and generation of simple finger movements studied with positron emission tomography. *NeuroImage*, 7, 73-85.
- *Denis, M. (1985). Visual imagery and the use of mental practice in the development of motor skills. *Canadian Journal of Sport Sciences*, 10, 4s-16s.
- Deschaumes-Molinario, C., Dittmar, A., & Vernet-Maury, E. (1992). Autonomic nervous system response patterns correlate with mental imagery. *Physiology & Behavior*, 51, 1021-1027.
- *Dominey, P., Decety, J., Broussolle, E., Chazot, G., & Jeannerod, M. (1995). Motor imagery of a lateralized sequential task is asymmetrically slowed in hemi-parkinson. *Neuropsychologia*, 33, 727-741.
- Dominey, P.F., Lelekov, T., Ventre-Dominey, J., & Jeannerod, M. (1998). Dissociable processes for learning the surface structure and abstract structure of sensorimotor sequences. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10, 734-751.
- *Donoghue, J.P. (1995). Plasticity of adult sensorimotor representations. *Current Opinion in Neurobiology*, 5, 749-754.
- *Doré, F.-Y., & Mercier, P. (1992). *Les fondements de l'apprentissage et de la cognition*. Boucherville: Gaëtan Morin.
- Doyon, J. (1997). Skill learning. In J. D. Schmahmann (Ed.), *The cerebellum and cognition: International review of neurobiology*, Vol. 41 (pp. 273-294). New York: Academic Press.

- Doyon, J., Gaudreau, D., Laforce, R.J., Castonguay, M., Bedard, P.J., Bedard, F., et al. (1997). Role of the striatum, cerebellum, and frontal lobes in the learning of a visuomotor sequence. *Brain & Cognition*, *34*, 218-245.
- Doyon, J., Owen, A.M., Petrides, M., Sziklas, V., & Evans, A.C. (1996). Functional anatomy of visuomotor skill learning examined with positron emission tomography. *European Journal of Neuroscience*, *8*, 637-648.
- Doyon, J., Song, A.W., Lalonde, F., Karni, A., Adams, M.M., & Ungerleider, L.G. (1999). Plastic changes within the cerebellum associated with motor sequence learning: a fMRI study. *NeuroImage*, *9*, S506.
- Doyon, J., Song, A.W., Karni, A., Lalonde, F., Adams, M.M., Ungerleider, L.G. (2002). Experience-dependent changes in cerebellar contributions to motor sequence learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *99*, 1017-1022.
- Doyon, J., & Ungerleider, L.G. (2002). Functional anatomy of motor skill learning. In L.R. Squire & D. Schacter (Eds.). *Neuropsychology of Memory, Third Edition* (pp. 225-238). Guilford Publications.
- Driskell, J.E., Copper, C., & Moran, A. (1994). Does mental practice enhance performance? *Journal of Applied Psychology*, *79*, 481-492.
- Elliott, R., Dolan, R.J., & Frith, C.D. (2000). Dissociable functions in the medial and lateral orbitofrontal cortex: evidence from human neuroimaging studies. *Cerebral Cortex*, *10*, 308-317.
- Enoka, R.M., & Fuglevand, A.J. (1993). Neuromuscular basis of the maximum voluntary force capacity of muscle. In M. D. Grabiner (Ed.). *Current issues in Biomechanic* (pp. 215-235). Champaign: Human Kinetics.
- Eslinger, P.J., Parkinson, K., Shamay, S.G. (2002). Empathy and social-emotional factors in recovery from stroke. *Current Opinion in Neurology*, *15*, 91-97.
- *Evans, A.C., Marrett, S., Neelin, P., Collins, L., Worsley, K., Dai, W., et al. (1992). Anatomical mapping of functional activation in stereotactic coordinate space. *NeuroImage*, *1*, 43-53.

- Evans, A.C., Marrett, S., Torrescorzo, J., Ku, S. & Collins, L. (1991a). MRI-PET correlation in three dimensions using a volume-of-interest (VOI) atlas. *Journal of Cerebral Blood Flow Metabolism*, 11, A69-A78.
- Evans, A.C., Thompson, C.J., Marrett, S., Meyer, E. & Mazza, M. (1991b). Performance evaluation of the PC-2048: a new 15-slice encoded-crystal PET scanner for neurological studies. *IEEE Transcranial Medical Imaging*, 10, 90-98.
- Fadiga, L., Buccino, G., Craighero, L., Fogassi, L., Gallese, V., & Pavesi, G. (1999). Corticospinal excitability is specifically modulated by motor imagery: a magnetic stimulation study. *Neuropsychologia*, 37, 147-158.
- Fansler, C.C., Poff, C.L., & Shepard, K.F. (1985). Effects of mental practice on balance in the elderly. *Physical Therapy*, 65, 1332-1338.
- Feltz, D.H., & Landers, D.M. (1983). The effects of mental practice on motor skill learning and performance : a meta-analysis. *Journal of Sports Psychology*, 5, 25-57.
- Fitts, P.M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47, 381-391.
- *Fox, P.T., Perlmutter, J.S. & Raichle, M.E. (1985). A stereotaxic method of anatomical localization for positron emission tomography. *Journal of Computer Assisted Tomography*, 9, 141-153.
- *Fox, P.T. & Raichle, M.E. (1984). Stimulus rate dependence of regional cerebral blood flow in human striate cortex, demonstrated by positron emission tomography. *Journal of Neurophysiology*, 51, 1109-1120.
- *Frey, S., & Petrides, M. (2000). Orbitofrontal cortex: a key prefrontal region for encoding information. *Proceedings of the National Academy of Science*, 97, 8723-8727.
- Friston, K.J., Frith, C.D., Passingham, R.E., Liddle, P.F., & Frackowiak, R.S. (1992). Motor practice and neurophysiological adaptation in the cerebellum: a positron tomography study. *Proceedings of the Royal Society of London, Biological Sciences.*, 248, 223-228.

- Fuster, J.M. (1997). *The prefrontal cortex. Anatomy, physiology, and neuropsychology of the frontal lobe* (3rd ed.). New York: Raven.
- Gandevia, S.C., Wilson, L.R., Inglis, J.T., & Burke, D. (1997). Mental rehearsal of motor tasks recruits alpha-motoneurons but fails to recruit human fusimotor neurons selectively. *Journal of Physiology (London)*, 505, 259-266.
- Gelmers, H.J. (1991). Cortical organization of voluntary motor activity as revealed by measurement of regional cerebral blood flow. *Journal of Neurological Sciences*, 52, 149-161.
- Goldman-Rakic, P.S. (1987). Circuitry of primate prefrontal cortex and regulation of behavior by representational memory. In: V.B. Mountcastle V.B. & F. Plum (Eds.), *Handbook of physiology*, 5, (pp. 373-417). Bethesda, MD: American Physiological Society.
- Gordon, A.M., Lee, J.H., Flament, D., Ugurbil, K., & Ebner, T.J. (1998). Functional magnetic resonance imaging of motor, sensory, and posterior parietal cortical areas during performance of sequential typing movements. *Experimental Brain Research*, 121, 153-166.
- Grafton, S.T., Mazziotta, J.C., Presty, S., Friston, K.J., Frackowiak, R.S., & Phelps, M.E. (1992). Functional anatomy of human procedural learning determined with regional cerebral blood flow and PET. *Journal of Neuroscience*, 12, 2542-2548.
- Grafton, S.T., Woods, R P., & Mike, T. (1994). Functional imaging of procedural motor learning : Relating cerebral blood flow with individual subject performance. *Human Brain Mapping*, 1, 221-234.
- Green, L.B. (1994). The use of imagery in the rehabilitation of injured athletes. In A. A. Sheikh & E. R. Korn (Eds.), *Imagery in sports and physical performance*. Amityville, New York: Baywood Publishing Company, pp 157-174.
- Green, J.B., Bialy, Y., Sora, E., & Thatcher, R.W. (1997). An electroencephalographic study of imagined movement. *Archives of Physical Medicine & Rehabilitation*, 78, 578-581.

- *Hale, B.D. (1982). The effects of internal and external imagery on muscular and ocular concomitants. *Journal of Sport Psychology*, 4, 379-387.
- Hall, C.R. (1980). Imagery for movement. *Journal of Human Movement Studies*, 6, 252-264.
- Hall, C.R. (1985). Individual differences in the mental practice and imagery of motor skill performance. *Canadian Journal of Sport Sciences*, 10, 17s-21s.
- Hall, C.R., & Buckolz, E. (1981). Recognition memory for movement patterns and their corresponding pictures. *Journal of Mental Imagery*, 5, 97-104.
- Hall, C., Buckolz, E., & Fishburne, G.J. (1989). Searching for a relationship between imagery ability and memory of movement. *Journal of Human Movement Studies*, 17, 89-100.
- Hall, C., Buckolz, E., & Fishburne, G.J. (1992). Imagery and the acquisition of motor skills. *Canadian Journal of Sport Sciences*, 17, 19-27.
- Hall, C., Moore, J., Annett, J., & Rodgers, W. (1997). Recalling Demonstrated Movements Using Imaginary and Verbal Rehearsal Strategies. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 68, 136-144.
- Hall, C.R., & Pongrac, J. (1983). *Movement Imagery Questionnaire*. Faculty of Physical Education. The University of Western Ontario, London, Canada.
- Hall, C.R., Rodgers, W., & Blair, K. (1990). The use of imagery by athletes in selected sports. *Sport Psychologist*, 4, 1-10.
- Hall, C., Schmidt, D., Durand, M.-C., & Buckolz, E. (1994). Imagery and motor skills acquisition. In A.A. Sheikh & E.R. Korn (Eds.), *Imagery in sports and physical performance*. (pp 121-134). Amityville, New York: Baywood Publishing Company.
- *Hallett, M., Fieldman, J., Cohen, L.G., Sadato, N., & Pascual-Leone, A. (1994). Involvement of primary motor cortex in motor imagery and mental practice. *Behavioral Brain Science*, 17, 210.
- Hashimoto, R., & Rothwell, J.C. (1999). Dynamic changes in corticospinal excitability

- during motor imagery. *Experimental Brain Research*, 125, 75-81.
- Herbert, R.D., Dean, C., & Gandevia, S.C. (1998). Effects of real and imagined training on voluntary muscle activation during maximal isometric contractions. *Acta Physiologica Scandinavica*, 163, 361-368.
- *Heuer, H. (1989). A multiple-representation's approach to mental practice of motor skills. In B. Kirkcaldy (Ed). *Normalities and abnormalities in human movement* (pp.36-57).
- Hinshaw, K.E. (1991). The effects of mental practice on motor skill performance: Critical evaluation and meta-analysis. *Imagination Cognition & Personality*, 11, 3-35.
- Howard, D.V., & Howard, J.H. (1992). Adult age differences in the rate of learning serial patterns: evidence from direct and indirect tests. *Psychology and Aging*, 7, 232-241.
- Hund-Georgiadis, M. & von Cramon, D.Y. (1999). Motor-learning-related changes in piano players and non musicians revealed by functional magnetic-resonance signals. *Experimental Brain Research*, 25, 417-425.
- Ikai, T., Findley, T.W., Izumi, S., Hanayama, K., Kim, H., Daum, M.C., et al. (1996). Reciprocal inhibition in the forearm during voluntary contraction and thinking about movement. *Electromyography & Clinical Neurophysiology*, 36, 295-304.
- Ingvar, D.H., & Philipsson, L. (1977). Distribution of the cerebral blood flow in the dominant hemisphere during motor ideation and motor performance. *Annals of Neurology*, 2, 230-237.
- Isaac, A., Marks, D.F., & Russell, D.G. (1986). An instrument for assessing imagery of movement: The vividness of movement imagery questionnaire (VMIQ). *Journal of Mental Imagery*, 10, 23-30.
- Jackson, P.L., Forget, J., Soucy, M.-C., Leblanc, M., Cantin, J.-F., & Doyon, J. (1997). Consolidation of visuomotor skills in humans: A psychophysical study. *Proceedings Society for Neuroscience*, 23, 1052.

- Jackson, P.L., Lafleur, M.F., Malouin, F., Richards, C.L., & Doyon, J. (2001). Potential role of mental practice using motor imagery in neurological rehabilitation. *Archives of Physical Medicine & Rehabilitation*, 82, 1133-1141.
- Jackson, P.L., Lafleur, M.F., Malouin, F., Richards, C.L., & Doyon, J. (in preparation a). Learning and retention of a foot-sequence task using motor imagery.
- Jackson, P.L., Lafleur, M.F., Malouin, F., Richards, C.L., & Doyon, J. (in preparation b). Validation of a sequential learning task for the lower limb.
- Jacobson, E. (1930). Electrical measurement of neuromuscular states during mental activities. *American Journal of Physiology*, 94, 24-34.
- Jacobson, E. (1932). Electrophysiology of mental activities. *American Journal of Psychology*, 44, 677-694.
- Janssen, J.J., & Sheikh, A.A. (1994). Enhancing athletic performance through imagery: an overview. In A. A. Sheikh & E. R. Korn (Eds.), *Imagery in sports and physical performance*. (pp. 1-22). Amityville, New York: Baywood Publishing Company.
- Jeannerod, M. (1995). Mental imagery in the motor context. *Neuropsychologia*, 33, 1419-1432.
- Jenkins, I.H., Brooks, D.J., Nixon, P.D., Frackowiak, R.S., & Passingham, R.E. (1994). Motor sequence learning: a study with positron emission tomography. *Journal of Neuroscience*, 14, 3775-3790.
- *Jerntorp, G., & Berglund, G. (1992). Stroke registry in Malmö, Sweden. *Stroke*, 23, 357-361.
- *Jorgensen, H.S., Nakayama, H., Raaschou, H.O., & Olsen, T.S. (1997). Acute stroke care and rehabilitation: an analysis of the direct cost and its clinical and social determinants: The Copenhagen Stroke Study. *Stroke*, 28, 1138-1141.
- Jueptner, M., Ottinger, S., & Fellows, S.J., Adamschewski J., Flerich L., Muller S.P., et al. (1997). The relevance of sensory input for the cerebellar control of movements. *NeuroImage*, 5, 41-48.

- *Kaas, J.H. (1991). Plasticity of sensory and motor maps in adult mammals. *Annual Reviews in Neuroscience*, 14, 137-167.
- Karni, A. (1996). The acquisition of perceptual and motor skills: a memory system in the adult human cortex. *Brain Research Cognitive Brain Research*, 5, 39-48.
- Karni, A., Meyer, G., Jezzard, P., Adams, M., Turner, R., & Ungerleider, L.G. (1995). Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during skill learning. *Nature*, 377, 155-158.
- Karni, A., Meyer, G., Rey-Hipolito, C., Jezzard, P., Adams, M.M., Turner, R., et al. (1998). The acquisition of skilled motor performance: fast and slow experience-driven changes in primary motor cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences, U.S.A.*, 95, 861-868.
- Karni, A. & Sagi, D. (1993). The time course of learning a visual skill. *Nature*, 365, 250-252.
- Kasai, T., Kawai, S., Kawanishi, M., & Yahagi, S. (1997). Evidence for facilitation of motor evoked potentials (MEPs) induced by motor imagery. *Brain Research*, 744, 147-150.
- Kasai, T., & Komiyama, T. (1988). The timing and the amount of agonist facilitation and antagonist inhibition of varying ankle dorsiflexion force in man. *Brain Research*, 447, 389-392.
- *Kazdin, A.E. (1992). *Research design in clinical psychology*. (2 ed.). Needham Heights, Massachusetts: Allyn and Bacon.
- Kiers, L., Fernando B., & Tomkins D. (1997). Facilitatory effect of thinking about movement on magnetic motor-evoked potentials. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, 105, 262-268.
- *Knutsson, E., & Richards, C. (1979). Different types of disturbed motor control in gait of hemiparetic patients. *Brain*, 102, 405-430.
- Korn, E.R. (1983). The use of altered states of consciousness and imagery in physical and

- pain rehabilitation. *Journal of Mental Imagery*, 7, 25-34.
- Lafleur, M.F., Jackson, P.L., Richards, C., Malouin, F., Evans, A., & Doyon, J. (2002). Motor learning produces parallel dynamic functional changes during the execution and imagination of sequential foot movements. *NeuroImage*, 16, 142-157.
- Landers, D.M. (1980). The arousal-performance relationship revisited. *Research Quarterly for Exercise & Sport*, 51, 77-90.
- *Lang, P.J. (1977). Imagery in therapy: an information processing analysis of fear. *Behavior Therapy*, 8, 862-886.
- Lang, W., Cheyne D., Hollinger P., Gerschlagler W., & Lindinger G. (1996). Electric and magnetic fields of the brain accompanying internal simulation of movement. *Brain Research Cognitive Brain Research*, 3, 125-129.
- *Lang, W., Petit, L., Hollinger, P., Pietrzyk, U., Tzourio, N., Mazoyer, B., et al. (1994). A positron emission tomography study of oculomotor imagery. *NeuroReport*, 5, 921-924.
- *Lee, C. (1990). Psyching up for a muscular endurance task: effects of image content on performance and mood state. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 12, 66-73.
- Leonardo, M., Fieldman, J., Sadata, N., Campbell, G., Ibanez, V., Cohen, L., et al. (1995). A functional magnetic resonance imaging study of cortical regions associated with motor task execution and motor ideation in humans. *Human Brain Mapping*, 3, 83-92.
- Lotze, M., Montoya, P., Erb, M., Hulsmann, E., Flor, H., Klose, U., et al. (1999). Activation of cortical and cerebellar motor areas during executed and imagined hand movements: An fMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11, 491-501.
- Luft, A.R., Skalej, M., Stefanou, A., Klose, U., & Voigt, K. (1998). Comparing motion- and imagery-related activation in the human cerebellum: A functional MRI study. *Human Brain Mapping*, 6, 105-113.

- MacKay, D.G. (1981). The problem of rehearsal or mental practice. *Journal of Motor Behavior*, 13, 274-285.
- Mahoney, M.J., & Avenier, M. (1977). Psychology of the elite athlete: An exploratory study. *Cognitive Therapy Research*, 1, 135-141.
- Malouin, F., Doyon, J., Dumas, F., Jackson, P.L., Evans, A.C., & Richards, C.L. (1997). Mental representation of locomotion: a PET study. *NeuroImage*, 5, s132.
- Marks, D. (1977). Imagery and consciousness: a theoretical review from an individual differences perspective. *Journal of Mental Imagery*, 1, 275-290.
- Martin, K.A., Moritz, S.E., & Hall, C.R. (1999). Imagery use in sport: A literature review and applied model. *Sport Psychologist*, 13, 245-268.
- *Mayo, N.E. (1993). Epidemiology and Recovery. *Physical Medecine and Rehabilitation*, 7, 1-25.
- McBride, E.R., & Rothstein, A.L. (1979). Mental and physical practice and the learning and retention of open and closed skills. *Perceptual & Motor Skills*, 49, 359-365.
- McLean, N., & Richardson, A. (1994). The role of imagery in perfecting already learned physical skills. In A. A. Sheikh & E. R. Korn (Eds.), *Imagery in sports and physical performance*. Amityville, New York: Baywood Publishing Company.
- Médina, J., Morali, C., & Sénik, A. (1986). *La philosophie comme débat entre les textes*. Paris : Magnard.
- Middleton, F.A. & Strick, P.L. (1997). Cerebellar output channels. *International Review of Neurobiology*, 41, 61-82.
- Miltner, W.H., Bauder, H., Sommer, M., Dettmers, C., & Taub, E. (1999). Effects of constraint-induced movement therapy on patients with chronic motor deficits after stroke : A replication. *Stroke*, 30, 586-592.
- *Minas, S. C. (1978). Mental practice of a complex perceptual-motor skill. *Journal of Human Movement Studies*, 4, 102-107.

- Morrow, D., Yesavage, J., Leirer, V., & Tinklenberg, J. (1993). Influence of aging and practice on piloting tasks. *Experimental Aging Research, 19*, 53-70.
- Mumford, B., & Hall, C. (1985). The effects of internal and external imagery on performing figures in figure skating. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences, 10*, 171-177.
- Murphy, S.M. (1994). Imagery interventions in sport. *Medical Sciences, Sports & Exercises, 26*, 486-494.
- Naito, E., & Matsumura, M. (1994). Movement-related slow potentials during motor imagery and motor suppression in humans. *Brain Research Cognitive Brain Research, 2*, 131-137.
- Naito, E., Kochiyama, T., Kitada, R., Nakamura, S., Matsumura, M., Yonekura, Y. et al. (2002). Internally simulated movement sensations during motor imagery activate cortical motor areas and the cerebellum. *Journal of Neuroscience, 22*, 3683-3691.
- Nissen, M.J., & Bullemer, P. (1987). Attentional requirements of learning: evidence from performance measures. *Cognitive Psychology, 19*, 1-32.
- *Norris, J.W. (1994). Stroke management around the world. *Cerebrovascular Diseases, 4*, 430-440.
- Nudo, R.J., Friel, K.M., & Delia, S.W. (2000). Role of sensory deficits in motor impairments after injury to primary motor cortex. *Neuropharmacology, 39*, 733-742.
- Nudo, R.J., Milliken, G.W., Jenkins, W.M., & Merzenich, M.M. (1996). Use-dependent alterations of movement representations in primary motor cortex of adult squirrel monkeys. *Journal of Neuroscience, 16*, 785-807.
- Nudo, R.J., Wise, B.M., SiFuentes, F., & Milliken, G.W. (1996). Neural substrates for the effects of rehabilitative training on motor recovery after ischemic infarct. *Science, 272*, 1791-1794.
- Oishi, K., Kimura, M., Yasukawa, M., Yoneda, T., & Maeshima, T. (1994). Amplitude

- reduction of H-reflex during mental movement simulation in elite athletes. *Behavioral Brain Research*, 62, 55-61.
- Okuda, J., Fujii, T., Yamadori, A., Kawashima, R., Tsukiura, T., Fukatsu, R., et al. (1998). Participation of the prefrontal cortices in prospective memory: evidence from a PET study in humans. *Neuroscience Letters*, 253, 127-130.
- Paivio, A. (1985). Cognitive and motivational functions of imagery in human performance. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences*, 10, 22S-28S.
- Page, S.J., Levine, P., Sisto, S.A., & Johnston, M.V. (2001a). Mental practice combined with physical practice for upper-limb motor deficit in subacute stroke. *Physical Therapy*, 81, 1455-1462.
- *Page, S.J., Levine, P., Sisto, S.A., & Johnston, M.V. (2001b). A randomized efficacy and feasibility study of imagery in acute stroke. *Clinical Rehabilitation*, 15, 233-240.
- Papaxanthis, C., Schieppati, M., Gentil, R., & Pozzo, T. (2002). Imagined and actual arm movements have similar durations when performed under different conditions of direction and mass. *Experimental Brain Research*, 143, 447-452.
- Parsons, L.M. (1994). Temporal and kinematic properties of motor behavior reflected in mentally simulated action. *Journal of Experimental Psychology Human Perception & Performance*, 20, 709-730.
- Pascual-Leone, A., Nguyet, D., Cohen, L.G., Brasil-Neto, J.P., Cammarota, A., & Hallett, M. (1995). Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills. *Journal of Neurophysiology*, 74, 1037-1045.
- Pavlidis, C., Miyashita, E., & Asanuma, H. (1993). Projection from the sensory to the motor cortex is important in learning motor skills in the monkey. *Journal of Neurophysiology*, 70, 733-741.
- Penhune, V., & Doyon, J. (2002). Dynamic cortical and subcortical networks in learning and delayed recall of timed motor sequences. *Journal of Neuroscience*, 22, 1397-1406.

- Petrides, M., & Pandya, D.N. (1994). In F. Boller, & J. Grafman (Eds). *Handbook of Neuropsychology* (Vol. 9, pp. 17–58). Amsterdam: Elsevier.
- *Petrides, M., Alivisatos, B., Evans, A.C., & Meyer, E. (1993). Dissociation of human mid-dorsolateral frontal cortex in memory processing. *Proceedings of the National Academy for Sciences USA*, 90, 873-877.
- Picard, N., & Strick, P. L. (1996). Motor areas of the medial wall: a review of their location and functional activation. *Cerebral Cortex*, 6, 342-353.
- Porro, C.A., Francescato, M.P., Cettolo, V., Diamond, M.E., Baraldi, P., Zuiani, C., et al. (1996). Primary motor and sensory cortex activation during motor performance and motor imagery: a functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Neuroscience*, 16, 7688-7698.
- *Raichle, M.E., Martin, W.R.W., Herscovitch, P., Mintun, M.A., & Markham, J. (1983). Brain blood flow measured with intravenous H₂O¹⁵. II. Implementation and validation. *Journal of Nuclear Medicine*, 24, 790-798.
- Rao, S.M., Binder, J.R., Bandettini, P.A., Hammeke, T.A., Yetkin, F.Z., Jesmanowicz, A., et al. (1993). Functional magnetic resonance imaging of complex human movements. *Neurology*, 43, 2311-2318.
- Ravey, J. (1998). In response to: Mental practice and imagery: a potential role in stroke rehabilitation. *Physical Therapy Review*, 3, 53-54.
- Richardson, A. (1964). Has mental practice any relevance to physiotherapy? *Physiotherapy*, 50, 148-151.
- Richardson, A. (1967a). Mental practice: a review and discussion (part I). *Research Quarterly*, 38, 95-107.
- Richardson, A. (1967b). Mental practice: a review and discussion (part II). *Research Quarterly*, 38, 263-273.
- Richardson, J.T.E. (1988). Vividness and unvividness: reliability, consistency and validity of subjective imagery ratings. *Journal of Mental Images*, 12, 115-122.

- Rogers, R.D., Owen, A.M., Middleton, H.C., Williams, E.J., Pickard, J.D., Sahakian, B.J., et al. (1999). Choosing between small, likely rewards and large, unlikely rewards activates inferior and orbital prefrontal cortex. *Journal of Neuroscience*, *20*, 9029-9038.
- *Roland, P.E., & Friberg, L. (1985). Localization of cortical areas activated by thinking. *Journal of Neurophysiology*, *53*, 1219-1243.
- Roland, P.E., Larsen, B., Lassen, N.A., & Skinhoj, E. (1980). Supplementary area and other cortical areas in organization of voluntary movements in man. *Journal of Neurophysiology*, *43*, 118-136.
- Rossi, S., Pasqualetti, P., Tecchio, F., Pauri, F., & Rossini, P.M. (1998). Corticospinal excitability modulation during mental simulation of wrist movements in human subjects. *Neuroscience Letters*, *243*, 147-151.
- Rossini, P.M., Rossi, S., Pasqualetti, P., & Tecchio, F. (1999). Corticospinal excitability modulation to hand muscles during movement imagery. *Cerebral Cortex*, *9*, 161-167.
- Rotella, R.J., Gansneder, B., Ojala, D., & Billing, J. (1980). Cognitions and coping strategies of elite skiers: An exploratory study of young developing athletes. *Journal of Sport Psychology*, *2*, 350-354.
- Roth, M., Decety, J., Raybaudi, M., Massarelli, R., Delon-Martin, C., Segebarth, C., et al. (1996). Possible involvement of primary motor cortex in mentally simulated movement: a functional magnetic resonance imaging study. *NeuroReport*, *7*, 1280-1284.
- Roure, R., Collet, C., Deschaumes-Molinario, C., Delhomme, G., Dittmar, A., & Vernet-Maury, E. (1999). Imagery quality estimated by autonomic response is correlated to sporting performance enhancement. *Physiology & Behavior*, *66*, 63-72.
- Roy, M., Gosselin, V., Lafleur, M. F., Jackson, P.L., & Doyon, J. (1998). Évaluation des qualités psychométriques du Questionnaire d'Imagerie Kinesthésique. *Science et Comportement*, *27*, S-191.

- Ruby, P., Decety, J. (2001). Effect of subjective perspective taking during simulation of action: a PET investigation of agency. *Nature Neuroscience*, 4, 546-550.
- Ryan, E.D., & Simons, J. (1982). Efficacy of mental imagery in enhancing mental rehearsal of motor skills. *Journal of Sport Psychology*, 4, 41-51.
- *Ryding, E., Decety, J., Sjöholm, H., Stenberg, G., & Ingvar, D.H. (1993). Motor imagery activates the cerebellum regionally. A SPECT rCBF study with ^{99m}TcHMPAO. *Cognitive Brain Research*, 1, 94-99.
- Sabbah, P., Simond, G., Levrier, O., Habib, M., Trabaud, V., Murayama, N., et al. (1995). Functional magnetic resonance imaging at 1.5 T during sensorimotor and cognitive task. *European Neurology*, 35, 131-136.
- Sackett, R.S. (1934). The influences of symbolic rehearsal upon the retention of a maze habit. *Journal of General Psychology*, 10, 376-395.
- Sale, D.G. (1988). Neural adaptation to resistance training. *Medical Sciences, Sports & Exercises*, 20, :S135-S145
- Sanes, J.N. (1994). Neurophysiology of preparation, movement and imagery. *Behavioral & Brain Sciences*, 17, 221-223.
- Sanes, J.N., & Donoghue J.P. (1997). Static and dynamic organization of motor cortex. *Advances in Neurology*, 73, 277-296.
- *Sanes, J.N., Donoghue, J.P., Thangaraj, V., Edelman, R.R., & Warach, S. (1995). Shared neural substrates controlling hand movements in human motor cortex. *Science*, 268, 1775-1777.
- Seitz, R. J., Canavan, A. G., Yaguez, L., Herzog, H., Tellmann, L., Knorr, U., et al. (1994). Successive roles of the cerebellum and premotor cortices in trajectorial learning. *NeuroReport*, 5, 2541-2544.
- Shanks, D.R., & Cameron, A. (2000). The effect of mental practice on performance in a sequential reaction time task. *Journal of Motor Behavior*, 32, 305-313.
- Sheehan, P.W. (1967). A shortened form of Betts' Questionnaire upon mental imagery.

- Journal of Clinical Psychology*, 23, 386-389.
- Schmahmann, J.D., Doyon, J., Toga, A. W., Petrides, M., & Evans, A.C. (2000). *MRI Atlas of the Human Cerebellum*. San Diego: Academic Press.
- Schnider, A., Treyer, V., & Buck, A. (2000). Selection of currently relevant memories by the human posterior medial orbitofrontal cortex. *Journal of Neurosciences*, 20, 5880-5884.
- Schnitzler, A., Salenius, S., Salmelin, R., Jousmäki, V., & Hari, R. (1997). Involvement of primary motor cortex in motor imagery: a neuromagnetic study. *NeuroImage*, 6, 201-208.
- Seitz, R.J., Canavan, A.G.M., Yaguez, L., Herzog, H., Tellmann, L., Knorr, U., et al. (1997). Representations of graphomotor trajectories in the human parietal cortex: evidence for controlled processing and automatic performance. *European Journal of Neuroscience*, 9, 378-389.
- Shaw, W. (1938). The distribution of muscular action potentials during imaging. *The Psychological Record*, 2, 195-216.
- Sheehan, R.N. (1967). A shortened version of Betts's questionnaire upon mental imagery. *Journal of Clinical Psychology*, 23, 386-389.
- Sirigu, A., Cohen, L., Duhamel, J.R., Pillon, B., Dubois, B., Agid, Y., et al. (1995). Congruent unilateral impairments for real and imagined hand movements. *NeuroReport*, 6, 997-1001.
- Sirigu, A., Duhamel, J.-R., Cohen, L., Pillon, B., Dubois, B., & Agid, Y. (1996). The mental representation of hand movements after parietal cortex damage. *Science*, 273, 1564-1568.
- *Squire, L.R. (1992). Declarative and nondeclarative memory: Multiple brain systems supporting learning and memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 4, 232-243.
- *Squire, L.R., & Knowlton, B.J. (1995). Memory, hippocampus, and brain systems. *Cognitive Neuroscience*, 53, 825-837.

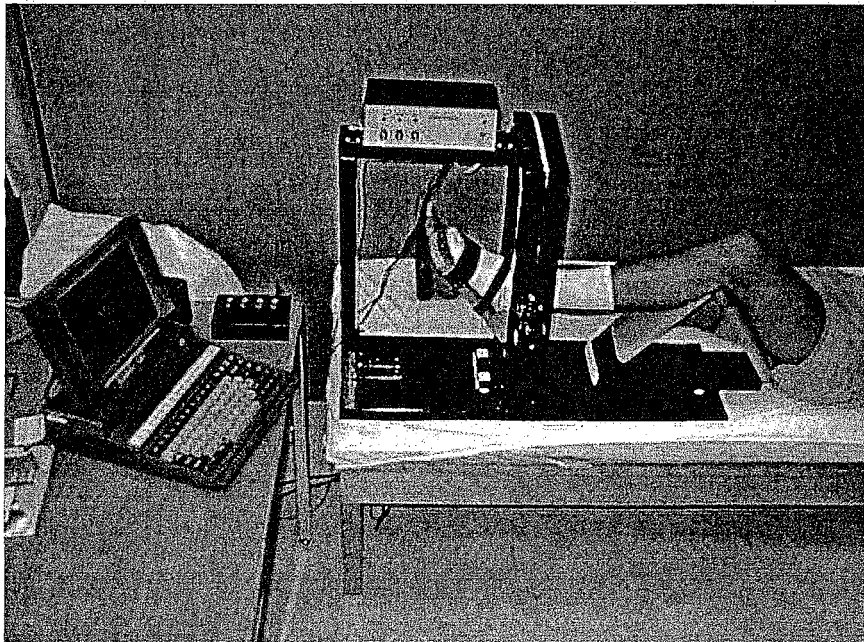
- *Squire, L.R., & Zola, S.M. (1996). Structure and function of declarative and nondeclarative memory systems. *Proceedings of the National Academy of Science U.S.A.*, 93, 13515-13522.
- Stephan, K.M., Fink, G.R., Passingham, R.E., Silbersweig, D., Ceballos-Baumann, A.O., Frith, C.D., & Frackowiak, R.S. (1995). Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects. *Journal of Neurophysiology*, 73, 373-386.
- Stephan, K.M., & Frackowiak, R.S. (1996). Motor imagery-anatomical representation and electrophysiological characteristics. *Neurochemical Research*, 21, 1105-1116.
- Stephan, K.M., Fink, G.R., Passingham, R.E., Silbersweig, D., Ceballos-Baumann, A.O., Frith, C.D., et al. (1995). Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects. *Journal of Neurophysiology*, 73, 373-386.
- *Suinn, R.M. (1980). Body thinking: psychology for olympic champions In R. M. Suinn (Ed.), *Psychology in Sports: Methods and Applications*: Burgess, Minneapolis.
- Talairach, J., & Tournoux, P. (1988). *Co-Planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain*. New-York: Thieme.
- Tanji, J. (1996). New concepts of the supplementary motor area. *Current Opinion in Neurobiology*, 6, 782-787.
- *Taub, E., Miller, N.E., Novack, T.A., Cook, E.W., Fleming, W.C., Nepomuceco, C.S., et al. (1993). Technique to improve chronic motor deficit after stroke. *Archives of Physical and Medicine Rehabilitation*, 74, 347-354.
- Thill, E.E., Bryche, D., Poumarat, G., & Rigoulet, N. (1997). Task-involvement and ego-involvement goals during actual and imagined movements: their effects on cognitions and vegetative responses. *Behavioral Brain Research*, 82, 159-167.
- Toni, I., Krams, M., Turner, R., & Passingham, R. E. (1998). The time course of changes during motor sequence learning: a whole-brain fMRI study. *NeuroImage*, 8, 50-61.

- *Twitchell, T.E. (1951). Restoration of motor function following hemiplegia in man. *Brain*, 74, 443-480.
- Tyszka, J.M., Grafton, S.T., Chew, W., Woods, R.P., & Colletti, P.M. (1994). Parceling of mesial frontal motor areas during ideation and movement using functional magnetic resonance imaging at 1.5 Tesla. *Annals of Neurology*, 35, 746-749.
- *Ungerleider, S., & Golding, J.M. (1991). Mental practice among olympic athletes. *Perceptual and Motor Skills*, 72, 1007-1017.
- Van Leeuwen, R., & Inglis, J.T. (1998). Mental practice and imagery: a potential role in stroke rehabilitation. *Physical Therapy Review*, 3, 47-52.
- *Verbrugge, L.M., Lepkowski, J.M., & Imanada, Y. (1989). Comorbidity and its impact on disability. *Milbank*, Q67, 450-484.
- Warner, L., & McNeill, M.E. (1988). Mental imagery and its potential for physical therapy. *Physical Therapy*, 68, 516-521.
- *Weiller, C., Chollet, F., Friston, K.J., Wise, R.J.S., & Frackowiak, R.S.J. (1992). Functional Reorganization of the brain in recovery from striatocapsular infraction in man. *Annals of Neurology*, 31, 463-472.
- *Weiller, C., Ramsay, S.C., Wise, R.J.S., Friston, K.J., & Frackowiak, R.S.J. (1993). Individual patterns of functional Reorganization in the human cerebral cortex after capsular infraction. *Annals of Neurology*, 33, 181-189.
- *Weiss, T., Hansen, E., Beyer, L., Conradi, M.-L., Merten, F., Nichelmann, C., et al. (1994). Activation processes during mental practice in stroke patients. *International Journal of Psychophysiology*, 17, 91-100.
- *Weiss, T., Hansen, E., Beyer, L., Conradi, M.-L., Merten, F., Nichelmann, C., et al. (1994). Mental practice of motor skills used in poststroke rehabilitation has own effects on central nervous activation. *International Journal of Neuroscience*, 78, 157-166.
- Willingham, D.B. (1998). A neuropsychological theory of motor skill learning.

Psychological Review, 105, 558-584.

- Worsley, K.J., Evans, A.C., Marrett, S., & Neelin, P. (1992). A three dimensional statistical analysis for CBF activation studies in human brain. *Journal of Cerebral Blood Flow Metabolism*, 12, 900-918.
- Worsley, K.J., Marrett, S., Neelin, P., Vandal, A.C., Friston, K.J., & Evans, A.C. (1996). A unified statistical approach for determining significant signals in images of cerebral activation. *Human Brain Mapping*, 4, 58-73.
- *Wrisberg, C.A., & Ragsdale, M.R. (1979). Cognitive demand and practice level: factors in the mental rehearsal of motor skills. *Journal of Human Movement Studies*, 5, 201-208.
- Wuyam, B., Moosavi, S.H., Decety, J., Adams, L., Lansing, R.W., & Guz, A. (1995). Imagination of dynamic exercise produced ventilatory responses which were more apparent in competitive sportsmen. *Journal of Physiology*, 482, 713-724.
- Yaguez, L., Canavan, A.G., Lange, H.W., & Homberg, V. (1999). Motor learning by imagery is differentially affected in Parkinson's and Huntington's diseases. *Behavioral Brain Research*, 102, 115-127.
- Yaguez, L., Nagel, D., Hoffman, H., Canavan, A.G., Wist, E., & Homberg, V. (1998). A mental route to motor learning: improving trajectorial kinematics through imagery training. *Behavioral Brain Research*, 90, 95-106.
- Yoo, E., Park, E., Chung, B. (2001). Mental practice effect on line-tracing accuracy in persons with hemiparetic stroke: a preliminary study. *Archives of Physical Medicine & Rehabilitation*, 82, 1213-1218.
- Yue, G., & Cole, K. (1992). Strength increases from the motor program: comparison of training with maximal voluntary and imagined muscle contractions. *Journal of Neurophysiology*, 67, 1114-1123.

ANNEXE 1
LA TÂCHE DE SÉQUENCE DU PIED



ANNEXE 2

QUESTIONNAIRE D'IMAGERIE VISUELLE ET KINESTHÉSIQUE (QIVK)
ET ÉTUDE PRÉLIMINAIRE DE SES PROPRIÉTÉS PSYCHOMÉTRIQUES

On dit souvent que l'imagination humaine est illimitée. Cette expression provient peut-être du fait que la plupart des gens peuvent s'imaginer aussi facilement le son d'une cloche, l'odeur d'une rose, le goût d'un citron, l'image d'un éléphant ou la sensation d'une piqûre d'insecte. L'imagerie motrice consiste à se représenter mentalement des gestes ou des actions, sans qu'aucun mouvement réel ne soit produit.

Ce questionnaire tente de déterminer la façon dont les gens sont capables de visualiser et ressentir des mouvements imaginés. Il n'y a pas de bonne ou de mauvaise réponse. Le but de cette échelle est d'obtenir un indice de la capacité des individus à se représenter mentalement différents mouvements.

Chacune des vingt questions suivantes comporte quatre étapes. Premièrement, vous aurez à prendre une position de départ. En second lieu, on vous demande d'effectuer un mouvement en position assise une seule fois, selon des consignes précises. Troisièmement, vous devrez vous remettre en position de départ, mais cette fois-ci, vous devrez imaginer l'action que vous venez de faire. Finalement, on vous demandera d'évaluer, sur une échelle de 1 à 5, soit la clarté visuelle de l'image que vous vous êtes formée (questions 1 à 10), ou l'intensité de la sensation de cette même image (questions 11 à 20).

Question 1

1. Demeurez assis, la tête bien droite, les deux mains posées sur vos cuisses.
2. Inclinez votre tête le plus loin possible, d'abord vers l'avant, puis vers l'arrière.
3. Revenez à la position initiale. Maintenant, imaginez ce mouvement. Concentrez-vous sur la clarté de l'image.
4. Indiquez sur l'échelle suivante l'énoncé qualifiant le mieux le mouvement que vous venez de vous imaginer.

1 /	2 /	3 /	4 /	5 /
Image aussi claire qu'un film	Image claire	Image modérément claire	Image floue	Pas d'image

Question 2

1. Demeurez assis, la tête bien droite, les deux mains posées sur vos cuisses.
2. Tout en gardant les bras le long du corps, relevez vos deux épaules le plus haut possible sans bouger la tête.
3. Revenez à la position initiale. Maintenant, imaginez ce mouvement. Concentrez-vous sur la clarté de l'image.
4. Indiquez sur l'échelle suivante l'énoncé qualifiant le mieux le mouvement que vous venez de vous imaginer.

1 /	2 /	3 /	4 /	5 /
Image aussi claire qu'un film	Image claire	Image modérément claire	Image floue	Pas d'image

Question 3

1. Demeurez assis, la tête bien droite, les deux mains posées sur vos cuisses.
2. Levez votre bras non-dominant (ex: le bras gauche si vous êtes droitier et vice-versa) vers le haut en le gardant tendu et devant vous jusqu'à ce qu'il soit à la verticale.
3. Revenez à la position initiale. Maintenant, imaginez ce mouvement. Concentrez-vous sur la clarté de l'image.
4. Indiquez sur l'échelle suivante l'énoncé qualifiant le mieux le mouvement que vous venez de vous imaginer.

1 /	2 /	3 /	4 /	5 /
Image aussi claire qu'un film	Image claire	Image modérément claire	Image floue	Pas d'image

Question 4

1. Demeurez assis, la tête bien droite, le bras dominant tendu à l'horizontale vers l'avant, la main ouverte et la paume vers le haut.
2. Pliez votre coude de façon à venir toucher avec la main dominante votre épaule du même côté.
3. Revenez à la position initiale. Maintenant, imaginez le mouvement. Concentrez-vous sur la clarté de l'image.
4. Indiquez sur l'échelle suivante l'énoncé qualifiant le mieux le mouvement que vous venez de vous imaginer.

1 /	2 /	3 /	4 /	5 /
Image aussi claire qu'un film	Image claire	Image modérément claire	Image floue	Pas d'image

Question 5

1. Demeurez assis, la tête bien droite, les deux mains posées sur vos cuisses, les paumes vers le haut.
2. Avec votre main dominante, ramenez chacun de vos doigts en contact avec votre pouce, un par un en commençant par l'index, au rythme de un mouvement par seconde.
3. Revenez à la position initiale. Maintenant, imaginez ce mouvement. Concentrez-vous sur la clarté de l'image.
4. Indiquez sur l'échelle suivante l'énoncé qualifiant le mieux le mouvement que vous venez de vous imaginer.

1 /	2 /	3 /	4 /	5 /
Image aussi claire qu'un film	Image claire	Image modérément claire	Image floue	Pas d'image

Question 6

1. Demeurez assis, la tête bien droite, les deux mains posées sur vos cuisses.
2. Inclinez votre corps le plus loin possible vers l'avant, puis redressez-vous.
3. Revenez à la position initiale. Maintenant, imaginez ce mouvement. Concentrez-vous sur la clarté de l'image.
4. Indiquez sur l'échelle suivante l'énoncé qualifiant le mieux le mouvement que vous venez de vous imaginer.

1 /	2 /	3 /	4 /	5 /
Image aussi claire qu'un film	Image claire	Image modérément claire	Image floue	Pas d'image

Question 7

1. Demeurez assis, la tête bien droite, les deux mains posées sur vos cuisses.
2. Relevez votre avant-jambe du côté non-dominant le plus près possible de l'horizontale puis redescendez-la.
3. Revenez à la position initiale. Maintenant, imaginez ce mouvement. Concentrez-vous sur la clarté de l'image.
4. Indiquez sur l'échelle suivante l'énoncé qualifiant le mieux le mouvement que vous venez de vous imaginer.

1 /	2 /	3 /	4 /	5 /
Image aussi claire qu'un film	Image claire	Image modérément claire	Image floue	Pas d'image

Question 8

1. Demeurez assis, la tête bien droite, les deux mains posées sur vos cuisses.
2. Déplacez le pied de votre côté dominant d'environ 30 centimètres (12 pouces) vers l'extérieur puis ramenez-le.
3. Revenez à la position initiale. Maintenant, imaginez le mouvement. Concentrez-vous sur la clarté de l'image.
4. Indiquez sur l'échelle suivante l'énoncé qualifiant le mieux le mouvement que vous venez de vous imaginer.

1 /	2 /	3 /	4 /	5 /
Image aussi claire qu'un film	Image claire	Image modérément claire	Image floue	Pas d'image

Question 9

1. Demeurez assis, la tête bien droite, les deux mains posées sur vos cuisses.
2. Avec votre jambe non-dominante, tapez du bout du pied trois fois au rythme de un mouvement par seconde tout en gardant le talon en contact avec le sol.
3. Revenez à la position initiale. Maintenant, imaginez le mouvement. Concentrez-vous sur la clarté de l'image.
4. Indiquez sur l'échelle suivante l'énoncé qualifiant le mieux le mouvement que vous venez de vous imaginer.

1 /	2 /	3 /	4 /	5 /
Image aussi claire qu'un film	Image claire	Image modérément claire	Image floue	Pas d'image

Question 10

1. Demeurez assis, la tête bien droite, les deux mains posées sur vos cuisses.
2. Sans bouger le talon, déplacez le bout du pied de votre jambe dominante vers l'extérieur, le plus loin possible.
3. Revenez à la position initiale. Maintenant, imaginez le mouvement. Concentrez-vous sur la clarté de l'image.
4. Indiquez sur l'échelle suivante l'énoncé qualifiant le mieux le mouvement que vous venez de vous imaginer.

1 /	2 /	3 /	4 /	5 /
Image aussi claire qu'un film	Image claire	Image modérément claire	Image floue	Pas d'image

Question 11

1. Demeurez assis, la tête bien droite, les deux mains posées sur vos cuisses.
2. Inclinez votre tête le plus loin possible, d'abord vers l'avant, puis vers l'arrière.
3. Revenez à la position initiale. Maintenant, imaginez le mouvement. Concentrez-vous sur l'intensité de la sensation.
4. Indiquez sur l'échelle suivante l'énoncé qualifiant le mieux le mouvement que vous venez de vous imaginer.

1 /	2 /	3 /	4 /	5 /
Sensation aussi intense qu'en faisant l'action	Sensation intense	Sensation modérément intense	Sensation vague	Pas de sensation

Question 12

1. Demeurez assis, la tête bien droite, les deux mains posées sur vos cuisses.
2. Tout en gardant les bras le long du corps, relevez vos deux épaules le plus haut possible sans bouger la tête.
3. Revenez à la position initiale. Maintenant, imaginez le mouvement. Concentrez-vous sur l'intensité de la sensation.
4. Indiquez sur l'échelle suivante l'énoncé qualifiant le mieux le mouvement que vous venez de vous imaginer.

1 /	2 /	3 /	4 /	5 /
Sensation aussi intense qu'en faisant l'action	Sensation intense	Sensation modérément intense	Sensation vague	Pas de sensation

Question 13

1. Demeurez assis, la tête bien droite, les deux mains posées sur vos cuisses.
2. Levez votre bras non-dominant (ex: le bras gauche si vous êtes droitier et vice-versa) vers le haut en le gardant tendu et devant vous jusqu'à ce qu'il soit à la verticale.
3. Revenez à la position initiale. Maintenant, imaginez le mouvement. Concentrez-vous sur l'intensité de la sensation.
4. Indiquez sur l'échelle suivante l'énoncé qualifiant le mieux le mouvement que vous venez de vous imaginer.

1 /	2 /	3 /	4 /	5 /
Sensation aussi intense qu'en faisant l'action	Sensation intense	Sensation modérément intense	Sensation vague	Pas de sensation

Question 14

1. Demeurez assis, la tête bien droite, le bras dominant tendu à l'horizontale vers l'avant, la main ouverte et la paume vers le haut.
2. Pliez votre coude de façon à venir toucher avec la main dominante votre épaule du même côté.
3. Revenez à la position initiale. Maintenant, imaginez le mouvement. Concentrez-vous sur l'intensité de la sensation.
4. Indiquez sur l'échelle suivante l'énoncé qualifiant le mieux le mouvement que vous venez de vous imaginer.

1 /	2 /	3 /	4 /	5 /
Sensation aussi intense qu'en faisant l'action	Sensation intense	Sensation modérément intense	Sensation vague	Pas de sensation

Question 15

1. Demeurez assis, la tête bien droite, les deux mains posées sur vos cuisses, les paumes vers le haut.
2. Avec votre main dominante, ramenez chacun de vos doigts en contact avec votre pouce, un par un en commençant par l'index, au rythme de un mouvement par seconde.
3. Revenez à la position initiale. Maintenant, imaginez le mouvement. Concentrez-vous sur l'intensité de la sensation.
4. Indiquez sur l'échelle suivante l'énoncé qualifiant le mieux le mouvement que vous venez de vous imaginer.

1 /	2 /	3 /	4 /	5 /
Sensation aussi intense qu'en faisant l'action	Sensation intense	Sensation modérément intense	Sensation vague	Pas de sensation

Question 16

1. Demeurez assis, la tête bien droite, les deux mains posées sur vos cuisses.
2. Inclinez votre corps le plus loin possible vers l'avant, puis redressez-vous.
3. Revenez à la position initiale. Maintenant, imaginez le mouvement. Concentrez-vous sur l'intensité de la sensation.
4. Indiquez sur l'échelle suivante l'énoncé qualifiant le mieux le mouvement que vous venez de vous imaginer.

1 /	2 /	3 /	4 /	5 /
Sensation aussi intense qu'en faisant l'action	Sensation intense	Sensation modérément intense	Sensation vague	Pas de sensation

Question 17

1. Demeurez assis, la tête bien droite, les deux mains posées sur vos cuisses.
2. Relevez votre avant-jambe du côté non-dominant le plus près possible de l'horizontale puis redescendez-la.
3. Revenez à la position initiale. Maintenant, imaginez le mouvement. Concentrez-vous sur l'intensité de la sensation.
4. Indiquez sur l'échelle suivante l'énoncé qualifiant le mieux le mouvement que vous venez de vous imaginer.

1 /	2 /	3 /	4 /	5 /
Sensation aussi intense qu'en faisant l'action	Sensation intense	Sensation modérément intense	Sensation vague	Pas de sensation

Question 18

1. Demeurez assis, la tête bien droite, les deux mains posées sur vos cuisses.
2. Déplacez le pied de votre côté dominant d'environ 30 centimètres (12 pouces) vers l'extérieur puis ramenez-le.
3. Revenez à la position initiale. Maintenant, imaginez le mouvement. Concentrez-vous sur l'intensité de la sensation.
4. Indiquez sur l'échelle suivante l'énoncé qualifiant le mieux le mouvement que vous venez de vous imaginer.

1 /	2 /	3 /	4 /	5 /
Sensation aussi intense qu'en faisant l'action	Sensation intense	Sensation modérément intense	Sensation vague	Pas de sensation

Question 19

1. Demeurez assis, la tête bien droite, les deux mains posées sur vos cuisses.
2. Avec votre jambe non-dominante, tapez du bout du pied trois fois au rythme de un mouvement par seconde tout en gardant le talon en contact avec le sol.
3. Revenez à la position initiale. Maintenant, imaginez le mouvement. Concentrez-vous sur l'intensité de la sensation.
4. Indiquez sur l'échelle suivante l'énoncé qualifiant le mieux le mouvement que vous venez de vous imaginer.

1 /	2 /	3 /	4 /	5 /
Sensation aussi intense qu'en faisant l'action	Sensation intense	Sensation modérément intense	Sensation vague	Pas de sensation

Question 20

1. Demeurez assis, la tête bien droite, les deux mains posées sur vos cuisses.
2. Sans bouger le talon, déplacez le bout du pied de votre jambe dominante vers l'extérieur, le plus loin possible.
3. Revenez à la position initiale. Maintenant, imaginez le mouvement. Concentrez-vous sur l'intensité de la sensation.
4. Indiquez sur l'échelle suivante l'énoncé qualifiant le mieux le mouvement que vous venez de vous imaginer.

1 /	2 /	3 /	4 /	5 /
Sensation aussi intense qu'en faisant l'action	Sensation intense	Sensation modérément intense	Sensation vague	Pas de sensation

Évaluation psychométrique d'un questionnaire d'imagerie motrice

(Texte provenant du projet de recherche dirigée effectué par Mélanie Roy et Valérie Gosselin à l'été 1998 et supervisé par Martin Lafleur, Philip Jackson et Julien Doyon)

L'amélioration de la performance par la pratique mentale a déjà été démontrée chez des sujets normaux, mais ce, presque uniquement auprès d'athlètes. Denis (1985) a également découvert, suite à l'analyse de plusieurs études, que la combinaison de la pratique physique et de la pratique mentale peut donner de meilleurs résultats que la pratique physique seule. Plusieurs auteurs ont donc proposé d'utiliser l'imagerie motrice dans le contexte de la réadaptation physique afin d'améliorer les habiletés motrices des patients souffrant d'un trouble moteur (Cornwall et al., 1991; Richardson, 1964; Warner & McNeill, 1988).

L'imagerie motrice consiste à imaginer un mouvement sans toutefois l'exécuter et elle implique principalement les composantes visuelle ainsi que kinesthésique. Plus précisément, l'aspect visuel implique la visualisation de l'image d'une action comme si elle était projetée sur un "écran mental", alors que l'aspect kinesthésique consiste à imaginer la sensation de l'action telle que ressentie lors de l'exécution. Les principales variables influençant la qualité de l'imagerie motrice sont entre autres, le type de mouvement à exécuter (niveau de difficulté, position, etc.), les instructions données au sujet (claires vs difficiles à comprendre) et les différences individuelles dans les capacités d'imagerie (voir Hall, Schmidt, Durand & Buckolz, 1994; Hall, Buckolz & Fishburne, 1992; Budney et al., 1994). Cette dernière variable peut être évaluée à l'aide de différents questionnaires dont il sera mention ultérieurement dans la problématique sur le Questionnaire d'Imagerie Kinesthésique.

Problématique

Comme il a été mentionné plus tôt, la facilité avec laquelle les gens effectuent de

l'imagerie motrice peut être évaluée à l'aide de différents questionnaires d'imagerie, tels que le Shortened form of Bett's Questionnaire upon Mental Imagery (1967), le Vividness of Movement Imagery Questionnaire (VMIQ) (1986) et le Movement Imagery Questionnaire (MIQ) (1983). Cependant, certains de ces questionnaires mesurent différents types d'imagerie autres que motrice (e.g., auditive, cutanée, gustative, olfactive, organique [Shortened form of Bett's Questionnaire upon mental imagery]). De plus, les directives de certains tests favorisent l'imagerie visuelle plutôt que kinesthésique de la part des sujets (VMIQ) et certaines des consignes contenues dans ces instruments sont impossibles à réaliser pour des personnes plus âgées (e.g., faire une roulade avant de s'imaginer en train de la reproduire [MIQ]). Aussi, l'échelle de type "Likert" (en sept points) que les sujets doivent utiliser pour la cotation dans ce dernier instrument nécessite une discrimination très fine entre les sept items, ce qui n'est pas toujours réaliste dans des conditions d'imagerie. C'est pour ces raisons que Jackson et Lafleur (en préparation) ont développé le Questionnaire d'Imagerie Visuel et Kinesthésique (QIVK), afin d'obtenir un instrument plus adapté pour les patients victimes d'un AVC qui participeront ultérieurement au programme de recherche développé par Doyon et ses collaborateurs.

Le QIK n'ayant jamais été administré, il s'avère nécessaire d'en estimer les qualités psychométriques auprès d'un groupe de sujets sains avant d'en faire un usage à plus grande échelle. Premièrement, la validité, qui concerne la précision avec laquelle un instrument mesure ce qu'il prétend mesurer (Robert, 1988), est estimée à l'aide de la méthode de la validité convergente. Cette méthode consiste à comparer deux instruments mesurant le même construit, afin de vérifier s'ils convergent (Kazdin, 1992). Dans la présente étude, le QIVK est comparé au MIQ car les qualités psychométriques de ce dernier ont déjà été évaluées. De plus, la fidélité, définie plus tôt, est estimée par la méthode du test-retest. L'évaluation des propriétés psychométriques de ce deuxième instrument constitue donc le second but de la présente recherche.

Hypothèses

Les variables dépendantes sont les moyennes des scores des sujets aux deux tests

d'imagerie motrice administrés (QIVK et MIQ). Deux hypothèses spécifiques sont formulées. Premièrement, une bonne validité convergente du QIVK sera observée grâce à une corrélation significative entre les moyennes des scores des sujets au QIVK et au MIQ lors du pré- et du post-test. Ceci s'appliquera autant aux scores de chacune des sous-échelles (visuelles et kinesthésiques) qu'au score total (1). De plus, la fidélité test-retest du QIVK sera adéquate, puisqu'il est prévu que le score obtenu lors de la première administration de cet instrument ne sera pas significativement différent de celui observé lors du retest (2). Cette stabilité se retrouvera dans l'ensemble du test et dans les sous-échelles, ainsi que chez les jeunes et les moins jeunes sujets.

Méthodologie

Sujets

Dix-huit volontaires droitiers (hommes et femmes) des environs de la ville de Québec sont recrutés pour participer à l'étude. Ces sujets sont séparés en deux groupes expérimentaux égaux, appariés quant au sexe et au niveau de scolarité. Le premier groupe est composé de 10 jeunes adultes (Groupe JA) âgés entre 20 et 27 ans (22.3 ± 2.4), tandis que le second est formé de huit adultes d'âge plus avancé (Groupe AA), soit entre 48 et 55 ans (50.8 ± 3.1). Le groupe JA a un niveau de scolarité se situant entre 8 et 19 années (14.5 ± 3.2), alors que le groupe AA possède un niveau de scolarité entre 11 et 19 années (14.4 ± 2.9). Lors du recrutement des sujets, les personnes ayant des dommages cérébraux connus, des troubles neurologiques (maladie de Parkinson, épilepsie, etc.) ou psychologiques majeurs (dépression, troubles cognitifs, bipolaires, etc.) sont exclus de l'étude.

Matériel

Le QIVK, développé par Jackson et Lafleur, est conçu pour obtenir un indice de la capacité des individus à se représenter mentalement différents mouvements, de façon visuelle et kinesthésique. Il comprend 20 questions divisées en quatre étapes successives. Premièrement, les sujets doivent prendre une position de départ. En second lieu, ils

effectuent un mouvement une seule fois selon des consignes précises. Troisièmement, ils se remettent en position de départ, mais cette fois-ci, ils doivent s'imaginer l'action qu'ils viennent de faire. Finalement, les sujets cotent, sur une échelle de 1 à 5, la clarté visuelle de l'image qu'ils ont formée (questions 1 à 10), et l'intensité de la sensation lors de l'imagination de l'action qu'ils viennent d'effectuer (questions 11 à 20). Par exemple, il est demandé aux sujets d'incliner leur tête le plus loin possible vers l'avant et ensuite vers l'arrière, puis de s'imaginer ce mouvement.

Le Movement Imagery Questionnaire (MIQ), développé en 1983 par Hall et Pongrac, est le second questionnaire d'imagerie motrice administré dans cette étude. L'original de ce questionnaire est une version anglaise traduite en français par deux personnes parfaitement bilingues, puis traduite à nouveau en anglais par deux autres experts, afin de s'assurer de l'exactitude de la première traduction. Bien que certaines faiblesses de ce test aient été évoquées précédemment, il a néanmoins été choisi pour mesurer la validité convergente, car ses qualités psychométriques ont été démontrées par Atienza, Balaguer et Garcia-Merita en 1994. En effet, les résultats de 110 sujets appuient la structure bifactorielle et la fidélité de ce questionnaire. De plus, il s'avère le meilleur questionnaire disponible pour évaluer le construit d'imagerie. Dans ce test, les sujets doivent tout d'abord exécuter un mouvement précis, s'en faire une image visuelle par la suite ou, selon la question, tenter de ressentir ce mouvement sans toutefois l'exécuter. Après l'accomplissement d'un item du questionnaire, les sujets doivent évaluer le niveau de difficulté à s'imaginer visuellement le mouvement et à le ressentir, sur une échelle de 1 à 7. Ce questionnaire comprend un total de 18 items impliquant des mouvements tels qu'aller toucher ses orteils avec le bout de ses doigts ou lever son genou le plus haut possible. Cependant, seulement 12 items sont administrés, puisque les six laissés de côté concernent des mouvements difficilement exécutables pour le groupe de sujets moins jeunes.

Procédure

Dans le cadre de l'étude, les sujets participent à un total de trois sessions expérimentales. Un délai d'en moyenne 7.3 jours sépare la première et la deuxième session, alors que la deuxième et la troisième sont séparées par un délai d'en moyenne 7.9 jours. Au cours de la première session, chaque sujet signe un formulaire de consentement, une fois le déroulement de l'expérience clairement expliqué. Un indice de dominance manuelle et un autre de latéralisation pédestre sont également mesurés au moyen de questionnaires, permettant de vérifier si les sujets sont effectivement droitiers. Ensuite, les sujets remplissent les deux questionnaires d'imagerie motrice. Cinq sujets du groupe JA et quatre du groupe AA, choisis aléatoirement, compléteront les questionnaires dans l'ordre inverse. Plus précisément, les sujets répondent aux dix dernières questions (kinesthésiques) avant de répondre aux dix premières (visuelles) pour le QIVK, et les six dernières questions du MIQ sont remplies avant les six premières. Cette variante a pour but de vérifier si l'ordre de passation a un effet sur les jugements des sujets aux sous-échelles.

Au cours de la seconde session expérimentale, d'une durée d'environ 15 minutes, les sujets effectuent une tâche d'apprentissage de séquence du pied. La dernière session dure environ 45 minutes, car les deux questionnaires d'imagerie motrice sont à nouveau administrés, en respectant l'ordre assigné lors de la première session.

Résultats

Avant d'analyser les résultats, un test de chi-carré est réalisé sur la variable "sexe", alors qu'un test t est calculé sur la variable "scolarité". Ceci a pour but de confirmer que les deux groupes (JA et AA) sont équivalents en termes de distribution du sexe et de la scolarité. Les résultats ne démontrent aucune différence significative entre les groupes par rapport au sexe, $\chi^2(1, N = 18) = 0.11$, n.s. et au niveau de scolarité, $t(18) < 1$, n.s.

Pour les analyses subséquentes, le nombre de sujets est réduit à 17, car les données d'un sujet du groupe AA ne sont pas utilisées dû à des scores trop extrêmes. Plusieurs coefficients de corrélation de Pearson sont calculés afin d'estimer la validité convergente du score global au QIVK ainsi que de ses sous-échelles visuelle et kinesthésique lors du pré-test seulement (voir Tableau 1). En comparant les résultats globaux obtenus au QIVK et au MIQ, une corrélation significative s'observe, $r = .61, p < .01$. Un autre coefficient de corrélation démontre une relation statistiquement significative entre la sous-échelle visuelle du QIVK et celle du MIQ lors de la première passation, $r = .53, p < .05$. Les sous-échelles kinesthésiques du QIVK et du MIQ sont également significativement corrélées, $r = .49, p < .05$.

Tableau 1: Coefficients de corrélation de Pearson calculés entre le Questionnaire d'Imagerie Kinesthésique (QIVK) et le Movement Imagery Questionnaire (MIQ) pour estimer la validité convergente du QIVK

	QIVK total	QIVK visuel	QIVK kinesthésique	MIQ total	MIQ visuel	MIQ kinesthésique
QIVK total	1.00**	0.84**	0.86**	0.61**	0.57*	0.62**
QIVK visuel	0.84**	1.00**	0.45	0.57*	0.53*	0.56*
QIVK kinesthésique	0.86**	0.45	1.00**	0.48	0.44	0.49*
MIQ total	0.61**	0.57*	0.48	1.00**	0.97**	0.97**
MIQ visuel	0.57*	0.53*	0.44	0.97**	1.00**	0.87**
MIQ kinesthésique	0.62**	0.56*	0.49*	0.97**	0.87**	1.00**

* $p < .05$. ** $p < .01$.

D'autre part, un calcul de corrélation de Pearson est effectué afin de vérifier la relation entre les sous-échelles visuelle et kinesthésique à l'intérieur de chaque questionnaire. Ce calcul révèle que les sous-échelles du QIVK sont corrélées à $r = .45$, n.s., tandis que les sous-échelles du MIQ corrélerent à $r = .87, p < .05$.

Trois analyses de variance (ANOVA) à mesures répétées sont effectuées dans le but de vérifier la fidélité test-retest du QIVK global et de ses sous-échelles. Une première analyse ne démontre aucune différence significative entre les scores totaux du QIVK au pré-test et au post-test, $F(1, 16) = 2.77$, n.s. De plus, aucune différence significative n'est obtenue suite à la seconde ANOVA entre le QIVK visuel au test et au retest, $F(1, 16) = 3.05$, n.s. Les résultats à la dernière analyse montrent que les scores du QIVK kinesthésique au pré- et au post-test ne diffèrent pas non plus de façon significative, $F(1, 16) < 1$, n.s.

La consistance interne du QIVK est également estimée afin d'obtenir des données complémentaires à propos des qualités psychométriques de ce test. Pour ce faire, une première analyse d'Alpha de Cronbach est effectuée parmi l'ensemble des 20 items du QIVK. Les résultats démontrent que ces items sont fortement corrélés entre eux, $\alpha = .92$. De plus, les données d'une deuxième analyse indiquent que les questions de la sous-échelle visuelle sont aussi fortement corrélés entre elles, $\alpha = .90$. Finalement, une troisième analyse d'Alpha de Cronbach montre que la sous-échelle kinesthésique est également formée d'items très corrélés entre eux, $\alpha = .90$.

Des analyses sont aussi effectuées pour s'assurer que le QIVK n'est pas influencé par des variables confondantes telles le sexe, l'âge, la scolarité et l'ordre de passation. Les résultats obtenus ne démontrent aucun effet de sexe, $t(15) = .24$, n.s., aucun effet de groupe, $t(15) = 1.02$, n.s., aucun effet de scolarité, $r = -.19$, n.s. et aucun effet d'ordre de passation, $t(15) = 1.74$, n.s.

Discussion

L'ensemble des résultats obtenus à la suite de cette étude confirme la plupart des hypothèses de départ. Pour ce qui est de l'évaluation psychométrique du QIVK, la première hypothèse voulant qu'il possède une bonne validité convergente est confirmée.

En effet, le QIVK et le MIQ sont corrélés significativement entre eux autant pour l'ensemble du test que pour les sous-échelles. Ceci suggère que le nouveau questionnaire développé par Jackson et Lafleur (en préparation) mesure un construit semblable à celui évalué par le MIQ. La corrélation obtenue semble suffisante pour suggérer que le QIVK mesure vraiment le construit d'imagerie motrice tel que retrouvé dans le MIQ, mais étant donné que la corrélation n'est pas trop élevée, il est possible de supposer que le QIVK n'est pas qu'une simple copie du MIQ. Sa création est alors justifiée puisqu'il apporte quelque chose de nouveau au concept d'imagerie motrice. Pour ce qui est des corrélations entre les sous-échelles visuelle et kinesthésique du QIVK et celles du MIQ, elles sont moins élevées que celle calculée entre les scores totaux de chacun des questionnaires. Ceci pourrait peut-être s'expliquer par les corrélations préalablement observées entre les deux sous-échelles du MIQ (MIQ visuel vs MIQ kinesthésique) et les deux du QIVK (QIVK visuel vs QIVK kinesthésique). En effet, les corrélations entre les sous-échelles du MIQ sont fortes, ce qui supposerait qu'elles mesurent un même construit et non deux différents (visuel et kinesthésique). Par contre, les corrélations entre les sous-échelles du QIVK sont moins élevées, laissant croire que ce questionnaire mesurerait deux construits relativement distincts. Ainsi, il devient difficile de comparer les sous-échelles des deux questionnaires (i.e. MIQ visuel vs QIVK visuel, MIQ kinesthésique vs QIVK kinesthésique) puisqu'il est impossible d'avoir la certitude que les corrélations sont effectuées entre des construits théoriquement comparables.

La seconde hypothèse stipulant que le QIVK possède une bonne stabilité test-retest est également confirmée. Effectivement, aucune différence significative n'est observée entre les jugements des sujets au QIVK lors du pré- et du post-test et ce, autant pour la performance aux sous-échelles qu'à leur score global. Ces résultats impliquent que ce questionnaire présente une bonne fidélité test-retest.

Par ailleurs, les données supplémentaires recueillies concernant la consistance interne du QIVK indiquent que l'ensemble des questions sont fortement corrélées entre elles. Ceci suggère que les items de ce questionnaire mesurent bien le construit d'imagerie motrice

d'une passation à l'autre et contribue donc à faire du QIVK un outil fiable. Ainsi, il serait probablement possible de prédire, avec une faible marge d'erreurs, le score d'un sujet au questionnaire en se basant sur ses résultats obtenus lors d'une évaluation précédente. Ceci s'applique également pour les sous-échelles visuelle et kinesthésique qui semblent mesurer adéquatement leur construit respectif.

Finalement, les analyses réalisées afin de vérifier l'influence de certaines variables sur la performance des sujets au QIVK démontrent que le sexe, l'âge, la scolarité et l'ordre de passation n'ont aucun effet. Ceci suggère que ce questionnaire pourrait être administré à une vaste clientèle et que le score à ce test ne serait pas biaisé par les différentes caractéristiques démographiques et expérimentales nommées ci-haut. Ceci vaut également pour les sous-échelles visuelle et kinesthésique du QIVK.

Malgré la confirmation de plusieurs hypothèses de départ, il est possible de constater que certains détails méthodologiques gagneraient à être améliorés. Premièrement, le nombre de sujets constituant l'échantillon est de toute évidence insuffisant pour accorder une forte confiance dans les résultats obtenus. Par contre, étant donné que la présente recherche constitue une étude-pilote, ce nombre de sujets s'avère acceptable pour avoir un bon aperçu des qualités psychométriques de la tâche motrice et du QIVK. Deuxièmement, il est possible de critiquer les délais trop brefs utilisés entre les trois sessions expérimentales de la tâche motrice (une semaine) et les deux passations du QIVK (deux semaines). En effet, la courte durée des délais ne permet peut-être pas de distinguer adéquatement la performance réelle des sujets de celle influencée par le souvenir qu'ils ont conservé de la passation du questionnaire. Ainsi, il serait peut-être intéressant d'allonger ces délais.

Conclusion

La présente étude-pilote permet d'offrir un estimé des propriétés psychométriques d'un questionnaire qui sera utilisé dans le cadre d'une étude plus générale. Ainsi, il a été démontré que le Questionnaire d'Imagerie Kinesthésique semble avoir une bonne fidélité

test-retest ainsi qu'une bonne validité convergente. Le QIVK s'avèrerait donc être un instrument adéquat à utiliser pour évaluer les capacités d'imagerie des sujets. Plus précisément, ce questionnaire permettra de mesurer le niveau de base de la capacité d'imagerie des sujets avant d'entreprendre l'entraînement par imagerie motrice et de vérifier si une amélioration s'est manifestée à la suite de l'entraînement.

ANNEXE 3

CHEDOKEE-MCMMASTER STROKE ASSESSMENT : LEG & FOOT

CHEDOKEE-McMASTER STROKE ASSESSMENT

SCORE FORM Page 3 of 4

IMPAIRMENT INVENTORY: STAGE OF RECOVERY OF LEG AND FOOT

LEG: Start at Stage 4 with the client in crook lying. **FOOT:** Start at Stage 3 with the client in supine. Test position is beside the item or underlined. If not indicated, the position has not changed. Place an X in the box of each task accomplished. Score the highest stage in which the client achieves at least two Xs. For "standing" test items, light support may be provided but weight bearing through the hand is not allowed. Shoes and socks off.

LEG		FOOT	
1	<input type="checkbox"/> not yet Stage 2	1	<input type="checkbox"/> not yet Stage 2
2	Crook lying <input type="checkbox"/> resistance to passive hip or knee flexion <input type="checkbox"/> facilitated hip flexion <input type="checkbox"/> facilitated extension	2	Crook lying <input type="checkbox"/> resistance to passive dorsiflexion <input type="checkbox"/> facilitated dorsiflexion or toe extension <input type="checkbox"/> facilitated plantarflexion
3	<input type="checkbox"/> <u>abduction</u> : adduction to neutral <input type="checkbox"/> hip flexion to 90° <input type="checkbox"/> full extension	3	Supine Sit <input type="checkbox"/> plantarflexion > ½ range <input type="checkbox"/> some dorsiflexion <input type="checkbox"/> extension of toes
4	Sit <input type="checkbox"/> hip flexion to 90° then extension synergy <input type="checkbox"/> bridging hip with equal weightbearing <input type="checkbox"/> knee flexion beyond 100°	4	<input type="checkbox"/> some eversion <input type="checkbox"/> inversion <input type="checkbox"/> <u>legs crossed</u> : dorsiflexion, then plantarflexion
5	Crook lying Sit Stand <input type="checkbox"/> extension synergy, then flexion synergy <input type="checkbox"/> raise thigh off bed <input type="checkbox"/> hip extension with knee flexion	5	Stand <input type="checkbox"/> <u>legs crossed</u> : toe extension with ankle plantarflexion <input type="checkbox"/> <u>sitting with knee extended</u> : ankle plantarflexion, then dorsiflexion <input type="checkbox"/> <u>heel on floor</u> : eversion
6	Sit Stand <input type="checkbox"/> lift foot off floor 5 x in 5 sec. <input type="checkbox"/> full range internal rotation <input type="checkbox"/> trace a pattern: forward, side, back, return	6	<input type="checkbox"/> <u>heel on floor</u> : tap foot 5 x in 5 sec <input type="checkbox"/> <u>foot off floor</u> : foot circumduction <input type="checkbox"/> <u>knee straight, heel off floor</u> : eversion
7	Stand <input type="checkbox"/> <u>unsupported</u> : rapid high stepping 10 x in 5 sec <input type="checkbox"/> <u>unsupported</u> : trace a pattern quickly; forward, side, back, reverse <input type="checkbox"/> <u>on weak leg with support</u> : hop on weak leg <input type="checkbox"/> STAGE OF LEG	7	<input type="checkbox"/> heel touching forward, then toe touching behind, repeat 5 x in 10 sec <input type="checkbox"/> <u>foot off floor</u> : circumduction quickly, reverse <input type="checkbox"/> up on toes, then back on heels 5 x <input type="checkbox"/> STAGE OF FOOT

COPY FREELY - DO NOT CHANGE

Copyright 1994 Chedoke-McMaster Stroke Assessment, Hamilton, ON

ANNEXE 4

CONSIGNES D'IMAGERIE MENTALE

- 1- On doit s'imaginer les mouvements à la 1ere personne, comme si on les exécutaient soi-même.
- 2- Évitez tous mouvements (surtout des jambes et de la tête) ainsi que toute contraction musculaire pendant la pratique mentale. Repos total, détendez-vous.
- 3- L'imagination ne doit pas être seulement visuelle, on doit "se sentir" exécuter le mouvement.
- 4- Gardez les yeux fermés pendant tout le bloc d'essais.
- 5- Comptez le nombre de séquence sur le bout des doigts. On doit la faire huit fois en tout.
- 6- Commencez à mon signal. Arrêtez et ouvrez les yeux après huit séquences. L'ouverture de vos yeux m'indique quand vous avez terminé.
- 7- Si vous perdez votre concentration, faites-moi signe et on recommencera le bloc d'essai.
- 8- Complétez les séquences le plus rapidement possible tout en évitant les erreurs.

ANNEXE 5
ÉTUDE PRÉLIMINAIRE À L'ÉTUDE DE TOMOGRAPHIE PAR
ÉMISSION DE POSITRONS

(Texte provenant du projet de recherche dirigée effectué par, Karine Gauthier, Martine Giroux et Mélanie Lévesque, et supervisé par Philip Jackson et Julien Doyon)

Apprentissage d'une séquence de mouvements
du pied par pratique mentale et imagerie motrice.

Gauthier, K.* , Giroux, M.* , Lévesque, M.* , Jackson, P.L.* & Doyon, J.#

*École de Psychologie, Université Laval, Québec et #Département de psychologie,
Université de Montréal, Montréal.

Correspondances :

Julien Doyon, Ph.D.

Département de psychologie

Université de Montréal

C.P. 6128, Succ. Centre-ville

Montréal (Québec)

Canada, H3C 3J7

Tél: 1-514-343-6502

Fax: 1-514-33-5787

E-mail: julien.doyon@umontreal.ca

Résumé

La pratique mentale (PM) réfère à la répétition de mouvements imaginés afin de faciliter l'apprentissage de comportements moteurs. Ce projet vise à évaluer si cette forme de pratique peut améliorer la performance physique et mentale lors d'une séquence de mouvements du pied et subséquemment améliorer ces performances suite à une session de pratique physique (PP). Deux groupes de 10 volontaires sont testés lors de cinq sessions. Le groupe expérimental pratique mentalement une séquence et le groupe contrôle n'en pratique pas, afin de vérifier s'il y a une amélioration de la performance et si cet apprentissage est spécifique aux mouvements pratiqués. Cette étude nous indique que la PM influencerait positivement la performance à une tâche motrice impliquant une séquence, et que cette influence pourrait se généraliser à une autre séquence relativement semblable. De plus, la PM engendre un gain de performance physique et mental, qui peut être observé à la suite d'une session de PP.

Introduction

La pratique mentale (PM) se définit comme une répétition de mouvements imaginés dans le but de faciliter l'exécution subséquente de comportements moteurs. Selon Richardson (1967), celle-ci consiste en une répétition symbolique d'une activité physique en l'absence totale de mouvement musculaire. La PM ne produit pas autant d'amélioration de la performance que la PP, mais elle est plus efficace que l'absence de pratique (Corbin, 1972; Feltz & Landers, 1983; Richardson, 1967). De plus, lors de l'exécution d'une tâche spécifique, la combinaison de la PM et de la PP peut produire autant d'amélioration de la performance que la PP seule, sinon plus (Stebbins, 1968 ; Kohl, Ellis & Roenker, 1992; Wulf, Horstmann & Choi, 1995).

La PM a surtout été étudiée dans le domaine de la psychologie sportive. Cette forme d'entraînement améliorerait la performance en facilitant l'apprentissage et en consolidant à long terme la mémorisation de séries de mouvements (Denis, 1985). À la suite de ces découvertes, plusieurs chercheurs (Van Leeuwen & Inglis, 1998; Decety & Mick, 1988) ont proposé l'utilisation de la PM en réadaptation physique chez des personnes ayant des problèmes neurologiques affectant la motricité. Cependant, très peu de recherches systématiques ont été effectuées dans ce domaine. Étant donné que des découvertes dans ce champ de recherche auraient potentiellement un impact positif sur les processus de réadaptation physique, il est pertinent d'approfondir le sujet. D'ailleurs, le présent projet s'insère dans un programme d'étude visant à vérifier l'utilité de la PM en réadaptation physique.

Les prochaines sections s'articulent en trois temps. Tout d'abord, différentes théories proposées pour expliquer les effets de la PM sont décrites. Ensuite, des effets mesurables de la PM sont présentés. Finalement, l'imagerie motrice, qui consiste en l'imagination de mouvements et qui semble être une composante nécessaire en PM, est discutée. Nous examinons donc les corrélats psychophysiques qui sont reliés à la PM et les processus qui ressemblent à ceux qui sont impliqués dans l'exécution physique de mouvements.

Théories de la pratique mentale

Plusieurs théories ont vu le jour à la suite de différentes expérimentations impliquant la PM. Notons toutefois qu'aucune théorie ne peut expliquer à elle seule et de façon satisfaisante l'apprentissage par PM. Afin de mieux cerner ce phénomène, l'intégration de différents éléments provenant des théories est nécessaire. Les deux théories les plus pertinentes ont été sélectionnées et sont présentées ci-dessous. Pour une plus grande discussion concernant les autres théories, les lecteurs sont référés à Budney, Murphy et Woolfolk (1994).

La théorie d'apprentissage symbolique propose que la PM facilite la performance motrice en permettant au sujet de répéter les composantes cognitives d'une tâche (Sackett, 1934). Ainsi, plus la tâche nécessite d'éléments cognitifs, plus la PM amène une réduction du temps de réponse. Cela implique que les mouvements, considérés comme des éléments cognitifs, sont symboliquement codés dans le système nerveux central, ce qui les rend plus faciles à exécuter. Dans l'exemple de l'apprentissage d'une série de mouvements de pied, la composante cognitive pourrait être une séquence qui serait exécutée plus rapidement que le simple enchaînement de mouvements aléatoires (Jackson, Lafleur, Malouin, Richards & Doyon, 1999).

La théorie psychoneuromusculaire, quant à elle, suggère que la PM d'un mouvement induit une impulsion nerveuse qui se propage jusqu'au muscle visé. Cette impulsion serait identique à celle associée à un mouvement réel, excepté qu'elle serait de plus faible intensité. Malgré le fait qu'aucun mouvement n'ait été exécuté, cette micro-innervation, mesurée par les potentiels d'action détectés à l'aide d'un électromyographe (EMG), préparerait le muscle à l'exécution physique de ce mouvement (Budney et al., 1994). Malgré le fait que certains auteurs (Jacobson, 1930; Suinn, 1976) aient rapporté de l'activité à l'EMG pendant l'imagination de mouvements, aucune recherche avec condition contrôle n'a pu quantifier cette activité (Feltz & Landers, 1983).

Effets de la pratique mentale

En plus de l'amélioration de la performance à des tâches de rapidité d'exécution et de précision, la PM agirait sur la force musculaire et la plasticité cérébrale. Il sera maintenant question de ces deux effets.

Yue et Cole (1992) ont constaté que l'entraînement mental produisait des effets sur l'augmentation de la force musculaire similaires à ceux de l'entraînement physique avec contraction des muscles. En effet, les résultats de leur étude démontrent que la force musculaire peut être augmentée sans qu'il n'y ait eu d'activation répétée du muscle. Ces résultats peuvent s'interpréter par l'activation de circuits moteurs centraux et non par celle des circuits périphériques, puisque aucune contraction n'a été observée par l'enregistrement électromyographique au cours de l'entraînement mental (Decety & Jeannerod, 1995).

Des études récentes suggèrent que le cortex cérébral peut être sujet à des transformations au niveau de son organisation suite à la PM (Donoghue, 1995; Karni et al., 1995). Ces modifications seraient comparables à celles qui sont produites lors de l'acquisition d'habiletés par la PP. Ce phénomène a été observé par Pascual-Leone et ses collaborateurs (1995), après seulement cinq jours de pratique d'exercices au piano. Dans leur étude, le groupe de sujets avec PM avait amélioré de façon significative leur performance, par rapport à leur niveau de base, mais cette amélioration était significativement inférieure à celle du groupe de PP. Cependant, des changements similaires au niveau de la plasticité cérébrale étaient observés. Il semble donc que la PM seule serait suffisante pour amener des modifications dans les circuits neuronaux impliqués dans les premiers stades d'acquisition d'habiletés motrices, même si peu de changements sont mesurés dans la performance des participants. De plus, cette étude a démontré que la modulation observée ne produit pas seulement une amélioration de la performance, mais avantage également le participant lors de l'apprentissage d'habiletés

avec un minimum de PP. Mentionnons qu'une partie intégrale de la PM est l'imagerie motrice. Cet aspect sera traité dans la section suivante.

Imagerie motrice

Le terme imagerie motrice est employé pour désigner la génération mentale d'images kinesthésiques. Lorsqu'on réfère à l'imagerie motrice, on parle généralement d'un processus par lequel on imagine les mouvements du corps. Par exemple, une personne s'imagine frapper une balle de tennis. La PM, quant à elle, est une méthode d'entraînement qui peut ou non faire appel à l'imagerie motrice et implique la répétition de mouvements. Pour obtenir un effet d'apprentissage s'apparentant à la pratique réelle, il semble que l'imagerie motrice doit être utilisée en PM (Jackson, Lafleur, Malouin, Richards & Doyon, 2001).

Les études présentées dans cette section indiquent que la simulation d'un mouvement par imagerie motrice est similaire à sa production réelle, sauf que l'exécution physique est inhibée. En effet, le temps pris pour imaginer un mouvement est directement corrélé avec le temps pris pour l'exécuter physiquement (Jeannerod, 1994; Jackson et al., 1999). De plus, comme la loi de Fitts (1954) le stipule, le temps de réaction ou temps pris pour imaginer un mouvement est directement corrélé avec le degré de difficulté du mouvement imaginé.

Des effets physiologiques semblables à ceux provoqués par un mouvement réel auraient aussi été observés avec l'imagerie motrice. En effet, on observe une augmentation significative de la fréquence respiratoire et du rythme cardiaque lorsqu'un sujet s'imagine en train de courir (Decety, Jeannerod, Durozard & Baverel, 1993). Cette activation est proportionnelle à l'effort réel demandé par le mouvement imaginé. Ainsi, l'imagination de la marche produirait une réponse moindre du système nerveux autonome que celle de la course.

D'autres études ont démontré que lors de l'exécution physique d'un mouvement, l'imagerie motrice induit des changements significatifs du débit sanguin dans les régions cérébrales associées à la motricité (Decety & Jeannerod, 1995; Lafleur, Jackson, Richards, Malouin & Doyon, 1999). De telles données suggèrent que le circuit neuronal associé à l'imagination d'un mouvement est similaire à celui impliqué dans son exécution physique.

Problématique et objectifs

L'ensemble des travaux présentés a permis de mettre en évidence certaines caractéristiques de l'apprentissage produit par la PM. Il semble notamment que l'imagerie motrice est une composante importante de ce type de pratique. Ceci a été démontré dans plusieurs types de tâche, notamment pour la précision du mouvement dans le sport et pour la force musculaire (Decety & Mick, 1988; Yue & Cole, 1992). Récemment, une étude a montré que la PM effectuée pendant une période de plusieurs semaines pouvait améliorer l'apprentissage d'une séquence de mouvements du pied (Jackson et al., en préparation). Cependant, lors de cette étude, la PM était administrée en alternance avec la PP.

Le présent projet a pour premier objectif de vérifier si la PM avec imagerie motrice effectuée seule et de façon intensive, pourrait augmenter la performance physique au stade initial de l'apprentissage d'une tâche de séquence motrice du pied. Selon notre première hypothèse, les participants qui pratiquent mentalement une séquence, auront une meilleure performance physique que ceux qui n'ont pas pratiqué mentalement de séquences. Selon la seconde hypothèse, la PM améliorera davantage la performance des participants lors de l'exécution physique pour une séquence pratiquée mentalement, que pour une séquence qui n'est pas pratiquée, ou dont l'ordre des éléments est aléatoire. Quant au second objectif et ses hypothèses, ils sont similaires ceux mentionnés ci-haut, à l'exception qu'ils concernent la performance mentale et non physique des participants. En ce qui concerne le troisième objectif, il consiste à évaluer si la PM engendre un gain de

performance physique et mental, qui peut être observé à la suite d'une session de PP. Les hypothèses sont similaires à celles des deux derniers objectifs et concernent donc la performance physique et mentale.

Méthodologie

Participants

Vingt sujets normaux âgés entre 18 et 31 ans ont été recrutés et ont joint l'étude sur une base volontaire. Les participants ont été pairés semi-aléatoirement en deux groupes de 10 personnes, un groupe expérimental (E) et un groupe contrôle (C). Les critères de pairage étaient l'âge (écart maximum de 2 ans), le sexe, le nombre d'années de scolarité (écart maximum de 3 ans) et les capacités d'imagerie des sujets. Il n'y a pas de différence significative ($t(17) = -1.37, p > 0.05$) entre la moyenne d'âge du groupe E (moyenne: 21.40 ± 2.27) et du groupe C (moyenne: 23.10 ± 3.21). Les deux groupes sont équivalents ($t(19) = -2.10, p > 0.05$) en ce qui concerne leurs années de scolarité (moyenne de E: 14.95 ± 2.00 ; moyenne de C: 16.7 ± 1.70). De plus, tous les sujets ont une dominance du côté droit pour la main et le pied. Les sujets ont reçu une compensation financière de 50 dollars pour les frais divers encourus par leur participation.

Matériel

La tâche de séquence de mouvements de pied est exécutée sur un appareil constitué d'une pédale en bois de 13 par 35 cm, montée sur un cadre de bois d'une longueur de 45 cm, d'une largeur de 29 cm et d'une hauteur de 60 cm. Un support coussiné pour le talon ainsi que la hauteur de la pédale sont ajustés pour chacun des volontaires en fonction de l'axe de rotation du pied. Cet axe est centré sur la malléole externe du sujet, afin de standardiser la position du pied. Deux bandes de Velcro attachées à la pédale servent à stabiliser le pied du sujet. Un potentiomètre fixé sur l'axe de la pédale et connecté à une boîte de relais est ajusté pour détecter trois différents angles de la pédale. La boîte de relais est reliée à un ordinateur portable (Hewitt Rand) qui génère des stimuli auditifs transmis par

un haut-parleur (Radio Shack, Model 21-549A) et qui enregistre les réponses des sujets grâce au logiciel MEL. Le temps de réponse des sujets, en millisecondes, ainsi que le succès et l'échec de chaque essai, sont enregistrés dans un fichier de données. Les sujets exécutent la tâche dans une position couchée sur le dos, sur un lit en bois couvert d'un matelas de mousse. Leur pied gauche est placé dans la pédale et leur jambe gauche est légèrement surélevée et supportée par des oreillers. L'utilisation du pied gauche procure une plus grande marge d'apprentissage, étant donné que ce pied est généralement moins habile que le droit chez les droitiers.

L'activité musculaire de surface est mesurée pendant la PM grâce à un EMG portable (Pathway MR-20, The Prometheus Group). Les instructions pour l'imagerie, quant à elles, sont écrites sur une feuille et sont lues aux sujets des deux groupes lors de leur première session expérimentale. De plus, un chronomètre manuel est utilisé afin de calculer le temps que requièrent les participants pour imaginer chaque bloc d'essais.

Procédure

Le protocole de cette expérience est de type pré-test/post-test avec groupe contrôle. Il comporte cinq sessions réparties sur cinq jours consécutifs.

Session 1

Lors de la première session expérimentale, les sujets lisent et signent un formulaire de consentement à la suite d'une explication détaillée de la procédure. Ils remplissent également une feuille de renseignements généraux et un questionnaire concernant la dominance de la main et du pied (basé sur Chapman, Chapman & Allen, 1987). Une fois le concept d'imagerie motrice expliqué, les capacités des participants est évaluée à l'aide du "Foot Tapping Index (FTI)" et d'un questionnaire d'imagerie visuelle et kinesthésique, le KVIQ.

Évaluation de la performance physique à la tâche. Tous les participants sont installés dans l'appareil décrit ci-haut avec leur pied gauche retenu à la pédale. Trois

positions de pied sont déterminées : flexion dorsale maximale (haut), position médiane, flexion plantaire maximale (bas). La boîte de relais est ensuite ajustée pour reconnaître ces positions. La tâche est expliquée aux sujets, c'est-à-dire qu'ils doivent exécuter une flexion dorsale (haut) en réponse à un son aigu et une flexion plantaire (bas) à la suite d'un son grave. Quand la pédale est dans la position médiane, un son (aigu ou grave) se fait entendre jusqu'à ce que le participant atteigne la position correspondante (succès) ou une autre position (erreur). La position médiane doit à nouveau être atteinte afin que le prochain son soit entendu. L'expérimentateur demande aux participants de répondre le plus rapidement possible et de faire le moins d'erreurs possibles. Un essai consiste donc en un mouvement débutant à la position médiane et se terminant à l'une des deux positions maximales (haut ou bas), ou en un mouvement commençant à une des positions maximales et se terminant à la position médiane. Pour familiariser les participants avec la tâche, ils doivent d'abord exécuter 20 essais de pratique.

Par la suite, tous les participants doivent apprendre deux séquences équivalentes de dix mouvements inscrites sur deux feuilles. L'une est constituée des positions suivantes: haut, haut, bas, haut, bas, bas, haut, bas, haut, bas (Séquence A) et l'autre, comme suit: haut, bas, haut, haut, bas, bas, bas, haut, bas, haut (Séquence B). Un bloc expérimental est constitué de quatre séquences. Les participants doivent ensuite nommer les séquences trois fois, afin de s'assurer qu'ils la connaissent explicitement. Pour évaluer leur niveau de performance physique de base, ils doivent tous exécuter deux blocs de chacune des séquences, puis effectuer deux blocs d'essais présentés dans un ordre aléatoire (condition C). Les temps de réponse pour chaque essai sont enregistrés automatiquement lors de cette étape.

Évaluation de la performance mentale à la tâche. Par la suite, deux électrodes sont collées à la jambe gauche des participants. L'une est placée sur le jambier antérieur et l'autre sur le muscle soléaire. Cette étape consiste à enregistrer l'activité électromyographique de surface pendant la PM et sert seulement de rétroaction aux

participants pour vérifier qu'il n'y a pas de contraction musculaire pendant les conditions d'imagerie à la session 1 et la session 5.

Ensuite, des explications concernant la manière d'imaginer la séquence de mouvements de pied sont fournies. Après un signal de départ, les participants doivent compter sur leurs doigts le nombre de séquences imaginées pour indiquer à l'expérimentateur le moment exact où ils ont complété un bloc d'essai (quatre séquences). En tout, les participants imaginent deux blocs de la séquence A, ainsi que deux blocs de la séquence B. Le temps en secondes pris pour imaginer chaque bloc est mesuré avec un chronomètre.

Pratique mentale. Finalement, les dix participants du groupe E doivent imaginer au total 75 blocs soit de la séquence A ou de la séquence B, réparties aléatoirement. La moitié des dix participants est assignée à la séquence A, tandis que l'autre moitié est assignée à la séquence B. À la suite de 5 blocs, il y a une pause de 30 secondes et après 10 blocs, il y en a une de une minute. Ainsi, tous les participants du groupe E apprennent initialement les deux séquences, mais ils ne pratiquent mentalement que la séquence qui leur est assignée. Quant au groupe C, il ne fait aucune PM. Les participants de ce groupe exécutent une tâche d'apprentissage moteur, non reliée à l'apprentissage d'une séquence, pour une période de temps similaire à la PM. Il s'agit d'une tâche d'adaptation sensorielle et motrice de la main, exécutée à l'aide d'un levier de commande.

Session 2, 3 et 4

À chaque rencontre, les participants des deux groupes doivent réciter les deux séquences afin de vérifier qu'ils s'en souviennent. Si le participant ne se rappelle pas les séquences, l'expérimentateur lui redonne les feuilles pour lui rafraîchir la mémoire. Lors des sessions 2, 3 et 4, les participants du groupe E pratiquent mentalement la séquence assignée durant 75 blocs, comme à la première session. Quant aux participants du groupe C, ils exécutent l'autre tâche d'apprentissage mentionnée plus haut.

Session 5

Lors de cette dernière session, une évaluation (session 5a) de la performance physique et mentale des participants des deux groupes se fait de la même façon que lors de la session 1. Ensuite, tous les participants pratiquent physiquement la séquence qui leur a été assignée pendant 30 blocs. Finalement, une autre évaluation (session 5b) de la performance physique et mentale est effectuée après la PP, pour vérifier si la PM améliore une PP ultérieure.

Résultats

Premièrement, il est à préciser que le seuil critique utilisé dans cette étude est de 0.05. Quant aux résultats obtenus au questionnaire d'imagerie visuelle et kinesthésique, ils n'indiquent aucune différence significative entre la performance des groupe E et C ($t(9) = -0.91, p > 0.05$). De plus, les résultats au «Foot Tapping Index (FTI)», démontrent que tous les participants exécutent un nombre plus élevé de mouvements du pied physiquement, que mentalement pour un temps donné. Donc, les deux groupes sont équivalents en terme de capacité d'imagerie.

Analyse de la performance physique

Les analyses sont effectuées sur la moyenne des temps de réponse des participants pour chaque essai à la tâche physique et ce, à chaque session. Un des premiers points à clarifier au départ est de savoir si la séquence A et la séquence B sont équivalentes, c'est-à-dire si elles sont effectuées physiquement avec autant de facilité. Une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées 2 x 2 x 3 (groupes x séquences x sessions) a été effectuée et l'effet principal de séquence n'était pas significatif ($F(1,18) = 0.03, p > 0.05$). De plus, aucune interaction impliquant le facteur séquence n'a été observée. Ces deux résultats

suggèrent que les séquences A et B sont d'un niveau de difficulté équivalent. Ainsi, elles ont été regroupés pour les analyses suivantes.

Une ANOVA à mesures répétées 2 x 3 x 3 a été effectuée afin de vérifier s'il y a une interaction significative entre les facteurs groupes, conditions (pratiquée/non-pratiquée/aléatoire) et sessions. Un effet principal significatif de sessions ($F(2,36) = 76.07, p < 0.05$) et de conditions ($F(2,36) = 7.94, p < 0.05$) a été observé. En examinant ces effets avec des tests de Tukey, on s'aperçoit que les sujets sont plus rapides à la session 2 qu'à la session 3 et que les sujets sont plus rapides à la condition Séquence Pratiquée et à la Séquence Non-pratiquée qu'à la condition Aléatoire ($p < 0.05$). Aucun effet de groupe n'a été observé, cela pouvant être attribuable, entre autres, au nombre restreint de sujets. Puisque nous avons certaines hypothèses concernant les différences entre les conditions, des analyses intra-groupe ont été réalisées.

Ainsi, des comparaisons multiples de Dunn *a priori* (test-t de Bonferroni) ont été effectuées. En ce qui concerne le groupe E, à la session 5a, l'analyse révèle une différence significative entre la condition Séquence Pratiquée et la Condition Aléatoire ($t(9) = -2.95, p < 0.05$). Par contre, aucune différence significative n'a été trouvée entre les conditions Séquence Non-pratiquée et Aléatoire. Finalement, on remarque que la performance entre la Séquence Pratiquée et la Séquence Non-pratiquée tend à être différente, mais qu'elle n'atteint pas le seuil critique significatif. Le même type d'analyses a été effectué à la session 5b soit après la PP. Les résultats sont semblables à ceux obtenus à la session 5a : la seule différence significative se trouve entre la condition Séquence Pratiquée et la condition Aléatoire ($t(9) = -3.04, p < 0.05$).

Quant au groupe C, à la session 5a, aucune différence significative entre les trois conditions n'est observée ($p > 0.05$). Par contre, la performance était significativement différente entre la Séquence Pratiquée et la condition Aléatoire ($t(9) = -3.43, p < 0.05$),

ainsi qu'entre la Séquence Non-pratiquée et la condition Aléatoire ($t(9) = -2.98, p < 0.05$) lors de la session 5b.

Insérer ici la figure 1

Analyse de la performance mentale

Lors de l'étude, l'expérimentateur a dû demander seulement à deux reprises aux participants de relaxer et de refaire le bloc d'essai jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de signaux indiquant une activité musculaire significative. Les analyses sont effectuées sur les temps moyen d'imagination des séquences. Le temps chronométré pour chaque bloc est divisé pour obtenir un temps de réponse par mouvement. Cette transformation est effectuée dans le but de comparer les temps d'imagination avec les temps de réponse physique. Une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées 2 x 2 x 3 (groupes x séquences x sessions) a été effectuée pour vérifier si les séquences sont équivalentes. Aucun effet principal de séquence n'est observé ($F(1, 54) = 0.73, p > 0.05$). Tous les sujets imaginent donc la séquence A et B avec autant de facilité.

Une ANOVA à mesures répétées 2 x 3 x 3 a été effectuée afin de vérifier s'il y a des interactions entre les groupes, les conditions (pratiquée/non-pratiquée/aléatoire) et les sessions. Un effet principal significatif de sessions a été observé ($F(2,54) = 9.90, p < 0.05$). Des comparaisons multiples de Dunn *a priori* (test-t de Bonferroni) ont été effectués. Les résultats indiquent que peu importe le groupe des participants et leur condition, ils sont meilleurs après la PM qu'à la première session et meilleurs après la session de PP qu'à la première session et après la session de PM. Un effet principal de groupe a également été observé ($F(1,54) = 11.16, p < 0.05$). En effet, les participants du groupe E imaginaient les séquences pratiquées et non-pratiquées plus rapidement que ne

le faisait le groupe C. Aucun effet de condition n'a été observé. Les mêmes analyses ont été effectuées séparément pour chaque groupe entre les conditions Séquence Pratiquée et Non-Pratiquée qui n'ont révélé aucune différence significative.

Insérer ici la figure 2

Discussion

Le premier objectif de la présente étude était de vérifier si la PM avec imagerie motrice pouvait augmenter la performance d'une tâche de séquence motrice du pied, et ce, lorsque la pratique est effectuée pendant quatre sessions intensives réparties sur quatre jours consécutifs. Il est important de rappeler que les deux séquences utilisées lors de l'expérimentation sont équivalentes, ce qui permet de penser que l'amélioration de la performance n'est pas due à la facilité de l'une ou l'autre des séquences. De plus, certaines mesures de contrôle ont été utilisées afin de vérifier que les participants exécutaient bien la tâche. En effet, une constance d'exécution peut être déduite par la technique de chronométrie qui consiste à vérifier si les temps d'imagination d'un bloc de séquences sont similaires entre eux ou encore, évoluent de façon constante. De plus, l'EMG a permis de constater que la pratique était uniquement mentale puisque les participants ne contractaient généralement pas leurs muscles lors de la PM.

L'hypothèse selon laquelle la performance physique associée à la Séquence Pratiquée mentalement serait supérieure à celle de la Séquence Non-pratiquée et Aléatoire est partiellement confirmée. On peut dire que la PM a eu un effet sur la performance physique si on compare les séquences avec la condition Aléatoire. Le groupe expérimental, après avoir pratiqué mentalement pendant quatre jours, est plus rapide en exécutant la Séquence Pratiquée que la condition Aléatoire. Donc, la PM aurait influencé

positivement l'apprentissage. Cependant, bien que les temps de réponses physique enregistrés entre la Séquence Pratiquée et Non-Pratiquée tendent à être différents après les sessions de PM, ils n'atteignent pas le seuil critique significatif ce qui aurait confirmé entièrement notre hypothèse. Ces résultats pourraient s'expliquer par la performance de deux sujets du groupe expérimental qui étaient plus lents, en général, que les autres participants. Étant donné le nombre restreint de participants, les temps de réponse de ces deux personnes, sans être significativement différents de ceux du groupe, ont pu masquer l'effet de la PM dans ce groupe. Une seconde explication possible serait qu'un aspect de l'apprentissage s'est transféré d'une séquence à une autre. Ainsi, le fait de pratiquer une séquence donnée pourrait se refléter en partie dans l'exécution d'une séquence constituée des mêmes composantes distribuées dans un ordre différent. Finalement, le développement de stratégies mnémoniques, tels que le regroupement d'éléments (Fortin & Rousseau, 1993) (exemple: haut-haut / bas-haut / bas-bas) pourrait se produire au cours des sessions de PM, facilitant ainsi la mémorisation de séquences. Ainsi, les stratégies développées au cours des sessions de PM pourraient se transférer à la PP de la Séquence Non-pratiquée. Ces stratégies pourraient également s'appliquer lorsque les personnes exécutent physiquement la tâche. En effet, la PM peut faire en sorte que le participant est plus habile à exécuter des séquences et cette habileté pourrait se refléter sur la vitesse d'exécution de la Séquence Pratiquée ainsi que sur celle de la Séquence Non-pratiquée. Par conséquent, il est plausible que les personnes qui ont pratiqué mentalement une séquence se fient moins aux sons pour exécuter la tâche et utilisent davantage leur mémoire, ce qui les rend plus rapides.

Quant au second objectif, le groupe E est plus rapide que le groupe C en ce qui concerne la performance mentale. Selon l'étude de Decety, Jeannerod & Prablanc (1996), le temps pris pour imaginer un mouvement est similaire à celui pris pour exécuter le même mouvement. Cependant, les résultats de notre étude ont démontré que les sujets du groupe expérimental amélioreraient leur rapidité d'imagination autant pour la Séquence Pratiquée que pour la Non-Pratiquée. Donc, la PM influencerait la performance mentale pour des séquences, mais pas de façon aussi spécifique qu'elle ne le fait pour la performance

physique.

Il est aussi possible qu'il y ait une différence dans la manière d'imaginer de certaines personnes. Ainsi, ces dernières n'apprendraient pas toutes le même aspect de la tâche. En effet, malgré le fait que des instructions standardisées et précises étaient données aux participants chaque jour pour qu'ils s'imaginent les mouvements selon une perspective interne, certains participants ont pu avoir de la difficulté à imaginer les mouvements en adoptant cette perspective. Celle qu'ils auraient utilisé pourrait s'apparenter davantage à une perspective externe. Il a été suggéré par Mahoney et Avener (1977) que l'imagerie mentale avec perspective interne aurait le potentiel d'être plus kinesthésique, car la personne répète une tâche en la ressentant de l'intérieur. Ces auteurs rapportent que chez des athlètes olympiques, ceux qui utilisaient une perspective interne lors de la PM apprenaient mieux que ceux qui utilisaient une perspective externe.

Quant au troisième objectif, il consiste à évaluer si la PM engendre un gain de performance physique et mental, pouvant être observé à la suite d'une session de PP. Cet objectif était basé sur les travaux de Pascual-Leone et ses collaborateurs (1995), qui indiquaient que la PM seule semblerait suffisante pour moduler les circuits neuronaux impliqués dans les premiers stades d'un apprentissage moteur. Cette modulation ne résulterait pas seulement en une amélioration de la performance, mais semblerait aussi avantager le sujet pour l'apprentissage subséquent d'habiletés motrices avec un minimum de PP. En effet, les deux groupes de notre étude ont bénéficié autant de la PP. Cependant, le groupe E était significativement plus rapide pour exécuter la Séquence Pratiquée que la condition Aléatoire, et la différence entre la condition Aléatoire et Non-Pratiquée n'était pas significative. Donc, l'effet prévu de la PM a été observé chez le groupe E, puisque l'avantage sur la Séquence Pratiquée est maintenu après la PP. Le groupe C, par contre, semble avoir autant appris les deux séquences avec la PP. La PM n'aurait donc pas seulement préparé l'apprentissage de la Séquence Pratiquée, mais elle aurait aussi interféré avec celui de la Séquence Non-pratiquée.

Globalement, cette étude suggère que la PM influence positivement la performance à une tâche motrice impliquant une séquence et qu'une partie de cette influence pourrait se généraliser à une autre séquence relativement semblable. De plus, la PM engendre un gain de performance physique et mentale qui peut être observé à la suite d'une session de PP.

Les implications pratiques qui découlent de cette étude pourraient être bénéfiques pour des personnes victimes de problèmes neurologiques affectant la motricité. Par exemple, la PM avec imagerie motrice pourrait préparer leur apprentissage avant qu'ils puissent marcher, et ainsi faciliter la réadaptation au moment où la PP redevient possible. Des expériences futures pourraient tenter d'observer les corrélats physiologiques reliés à l'apprentissage d'une séquence de mouvements de pied, par exemple à l'aide d'un appareil de tomographie par émission de positrons. La recherche en ce sens devrait mener à une meilleure compréhension des structures cérébrales impliquées lors de l'imagination du mouvement et lors de l'exécution physique du même mouvement. De nouvelles découvertes et applications dans ce domaine pourraient permettre une prise en charge plus rapide et plus efficace des patients impliqués dans un processus de réadaptation physique.

Références

- Bohan, M., Pharmer, J.A., & Stokes A.F. (1999). When does imagery practice enhance performance on a motor task? *Perceptual and Motor Skills*, 88, 651-658.
- Budney, J.A., Murphy, S.M., & Woolfolk, R.L. (1994). Imagery and motor performance: What do we really know?. In A. A. Sheikh & E. R. Korn (Eds.), *Imagery in sports and physical performance*. Amityville, New York: Baywood Publishing Company.
- Chapman, J.P., Chapman, L.J., & Allen, J.J. (1987). The measurements of foot preference. *Neuropsychologia*, 25 (3), 579-584.
- Corbin, C.B. (1972). Mental practice. In W.P. Morgan (Ed.), *Ergogenic aids and muscular performance*. New York: Academic Press.
- Decety J., & Mick, G. (1988). Représentation mentale du mouvement et performance motrice. Approche neuro-cognitive et intérêt pratique. *Médecine du Sport*, 62, 232-239.
- Decety J., & Jeannerod, M., (1995). L'imagerie et son substrat neurologique. *Revue Neurologique*, 151, 474-479.
- Decety, J., Jeannerod, M., Durozard, D., & Baverel, G. (1993). Central activation of autonomic effectors during mental simulation of motor actions in man. *Journal of Physiology*, 461, 549-563.
- Decety, J., Jeannerod, M., & Prablanc. (1989). Timing of mentally represented actions. *Behavioral Brain Research*, 34, 35-42.
- Denis, M. (1985). Visual imagery and the use of mental practice in the development of motor skills. *Canadian Journal of Sport Sciences*, 10, 4-16.
- Donoghue, J.P. (1995) . Plasticity of adult sensorimotor representations. *Current Opinion in Neurobiology*, 5, 749-754.
- Feltz, D.H., & Landers, D.M. (1983). The effects of mental practice on motor skill learning and performance: A meta-analysis. *Journal of Sports Psychology*, 5, 25-57.

- Fitts, P.M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47, 381-391.
- Fortin, C. , & Rousseau, R. (1993). *Psychologie cognitive : Une approche de traitement de l'information*. Sainte-Foy : Télé-université : Presse de l'Université du Québec.
- Hall, C.R., Rodgers, W., & Blair, K. (1990). The use of imagery by athletes in selected sports. *Sport Psychologist*, 4, 1-10.
- Hall, C., Schmidt, D., Duran, M.- C., & Buckolz, E. (1994). Imagery and motor skills acquisition. In A. A. Sheikh & E. R. Korn (Eds.), *Imagery in sports and physical performance*. Amityville, New York: Baywood Publishing Company.
- Jackson, P.L., Lafleur, M.F., Malouin, F., Richards, C., & Doyon, J. (1999). The effect of mental practice in the learning of a sequence of foot movements. *Society for Neuroscience Abstracts*, 25, 1899.
- Jacobson, E. (1930). Electrical measurement of neuromuscular states during mental activities. *American Journal of Physiology*, 94, 22-34.
- Jeannerod, M. (1994) . The representing brain: Neural correlates of motor imagery and intention. *Behavioral Brain Science*, 17, 187-245.
- Karni, A., Meyer, G., Jezard, P., Adams, M., Turner, R., & Ungerleider, L.G. (1995). Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during skill learning. *Nature*, 377, 155-158.
- Kohl, R. M., Ellis, S. D., & Roenker, D. L. (1992). Alternating actual and imagery practice: preliminary theoretical considerations. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 63, 162-170.
- Lafleur, M.F., Jackson, P.L., Malouin, F., Richards, C.L., Evans, A.C., & Doyon, J. (1999). Functional neuroanatomy of executed and imagined sequential movements of the foot in human examined with PET. *Society for Neuroscience Abstracts*, 25, 1899.

- Mahoney, M.J., & Avener, M. (1977). Psychology of the elite athlete: an exploratory study. *Cognitive Therapy Research, 1*, 135-141.
- Paivio, A. (1985). Cognitive and motivational Functions of imagery in human performance. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences, 10*, 22S-28S.
- Pascual-Leone, M. V., Dang, N., Cohen, L. G., Brasil-Neto, J. P., Cammarota, A., & Hallett, M. (1995). Modulation of muscle response evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills. *Journal of Neurophysiology, 74*, 1037-1045.
- Richardson, A. (1967). Mental practice: a review and discussion (part I). *Research Quarterly, 38*, 95-107.
- Roure, R., Collet, C., Deschaumes-Molinaro, C., Delhomme, G., Dittmar, A., & Vernet-Maury, E. (1999). Imagery quality estimated by autonomic response is correlated to sporting performance enhancement. *Physiology and Behavior, 66*, (1), 63-72.
- Sackett, R. S. (1934). The influences of symbolic rehearsal upon the retention of a maze habit. *Journal of General Psychology, 10*, 376-395.
- Stebbins, R.J. (1968). A comparison of the effects of physical and imagery practice in learning a motor skill. *Research Quarterly, 39*, 714-720.
- Suinn, R. M. (1976). Body thinking: Psychology of olympics champs. *Psychology Today, 10* (2), 38-44.
- Ungerleider, S., & Golding, J.M. (1991). Mental practice among olympic athletes. *Perceptual and Motor Skills, 72*, 1007-1017.
- Van Leeuwen, R., & Inglis, J.T. (1998). Mental practice and imagery: A potential role in stroke rehabilitation. *Physical Therapy Reviews, 3*, 47-52.
- Wulf, G., Horstmann, G., & Choi, B. (1995). Does mental practice work like physical practice without information feedback? *Research Quarterly for Exercise and Sport, 66* (3), 262-267.

Yue, G. & Cole, K. (1992) . Strength increases from the motor program: comparison of training with maximal voluntary and imagined muscle contractions. *Journal of Neurophysiology*, 67, 1114-1123.

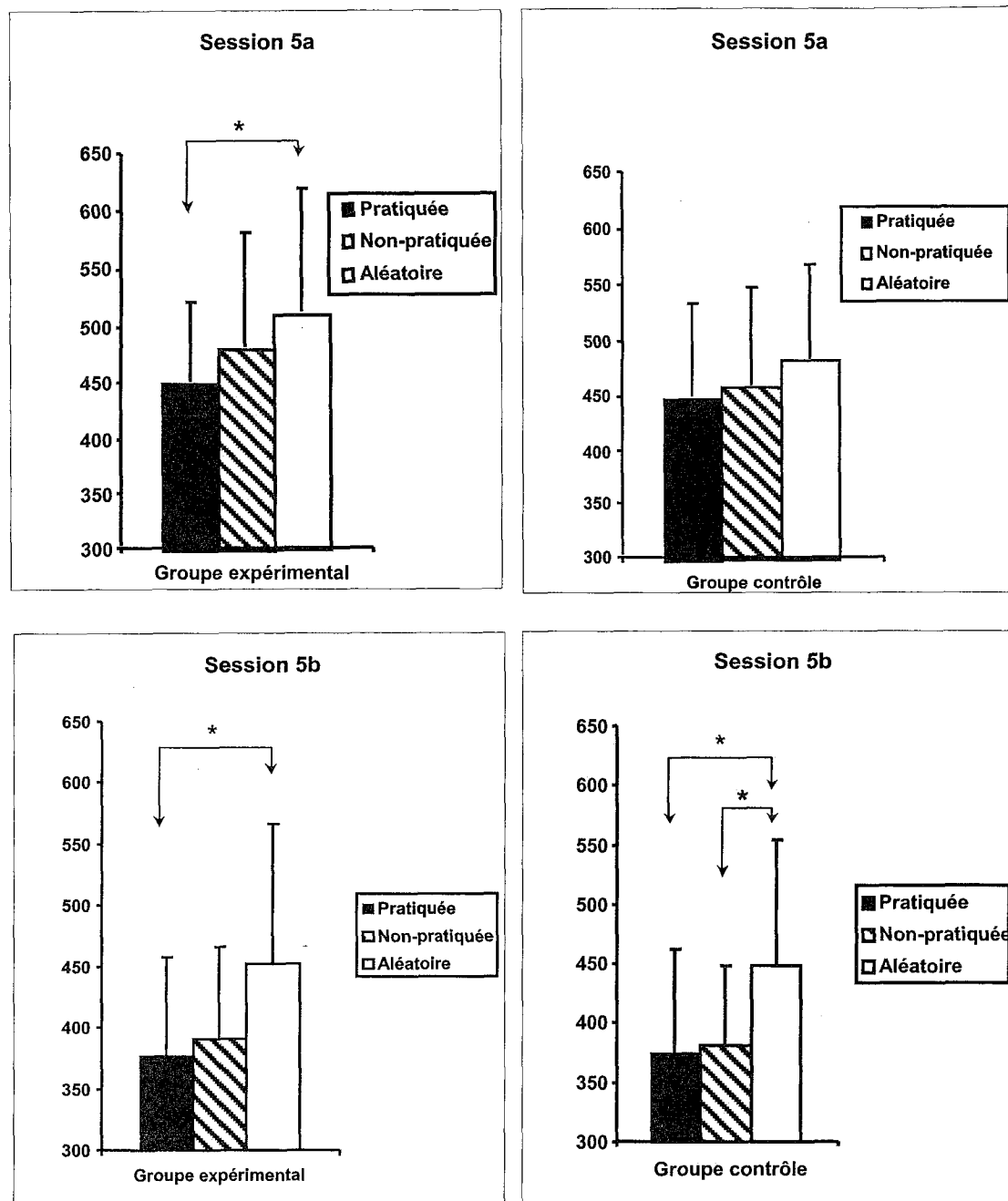


Figure 1: Temps de réponse moyen, en millisecondes, lors de l'exécution physique après la pratique mentale (Session 5a) et après la pratique physique (Session 5b), pour chacun des groupes et chacune des conditions.* Différence significative, $p < 0.05$.

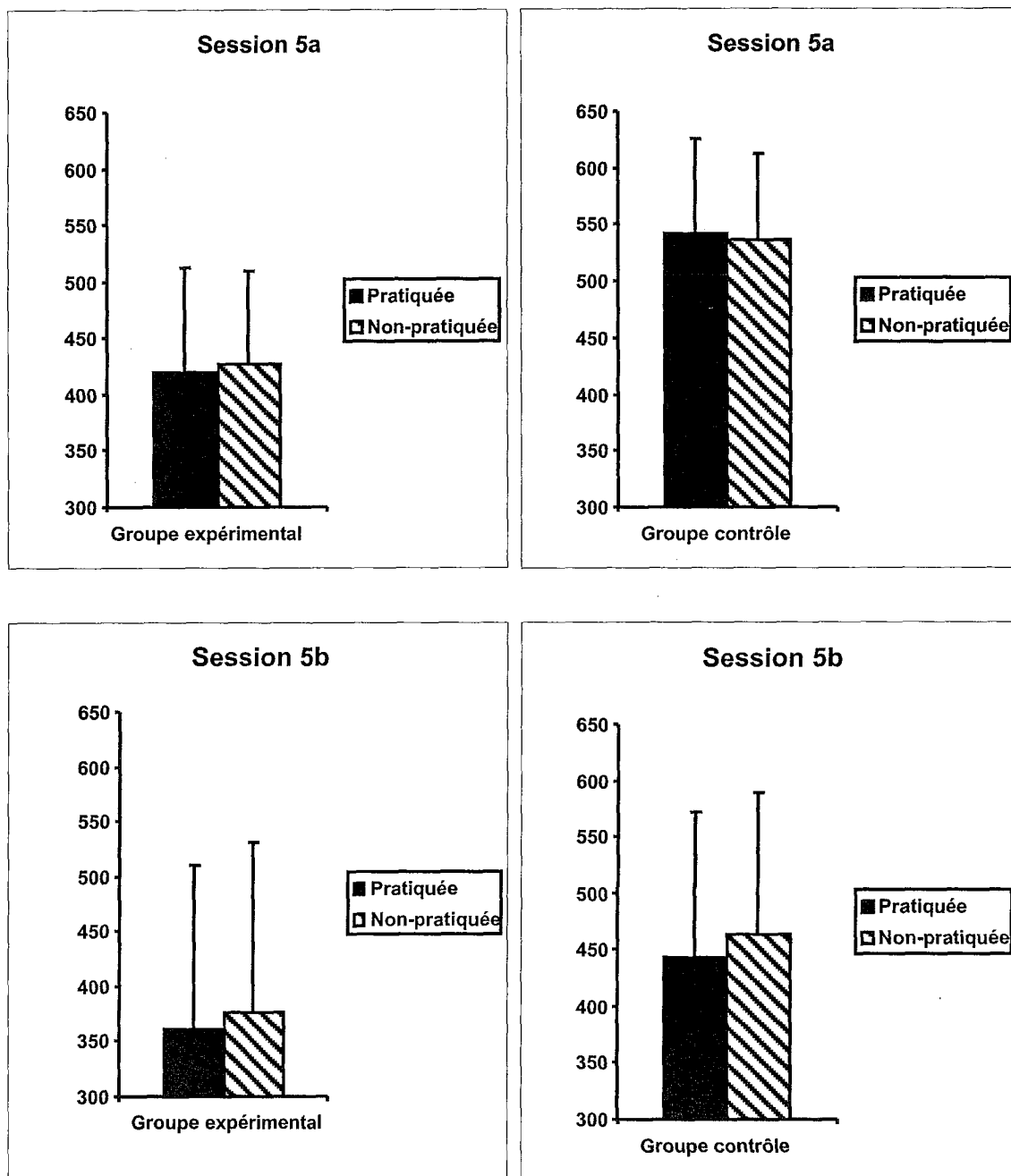


Figure 2: Temps de réponse moyen, en millisecondes, lors de la performance mentale après la pratique mentale (Session 5a) et après la pratique physique (Session 5b), et ce, pour chacun des groupes et chaque condition.