

BF
20.5
UL
1998
093

MARIE-CHRISTINE OUELLET

**APPRENTISSAGE D'UNE HABILITÉ COGNITIVE MESURÉ
À L'AIDE DU TEST DE LA TOUR DE LONDRES**

Mémoire
présenté
à la Faculté des études supérieures
de l'Université Laval
pour l'obtention
du grade de maître en psychologie (M.Ps.)

École de psychologie
FACULTÉ DES SCIENCES SOCIALES
UNIVERSITÉ LAVAL

DÉCEMBRE 1998

© Marie-Christine Ouellet, 1998



Résumé

Le présent mémoire avait pour but de faire la synthèse des connaissances sur l'acquisition d'habiletés cognitives et de développer une nouvelle tâche qui permettrait l'étude des différents processus d'apprentissage impliqués dans ce type de mémoire. Pour ce faire, deux études utilisant deux schèmes expérimentaux différents chez des sujets sains volontaires ont été complétées à l'aide d'une version informatisée de la tâche de la Tour de Londres. Ces études avaient pour objectifs (1) d'examiner le cours de l'apprentissage, par la pratique, d'une nouvelle habileté de résolution de problèmes, (2) de tenter de caractériser les processus qui sous-tendent l'apprentissage de ce type d'habileté et (3) de démontrer qu'un apprentissage spécifique des procédures associées à la résolution de problèmes répétés peut être dissocié d'un apprentissage général des stratégies utilisées pour résoudre cette tâche. Dans l'ensemble, les sujets ont montré une amélioration significative de leur performance avec la pratique suggérant que cette nouvelle version du Test de la Tour de Londres constitue un bon outil pour mesurer l'apprentissage d'une habileté cognitive. Les résultats démontrent également que l'amélioration observée à cette épreuve est associée à une accélération de la phase de réflexion ou de planification au début de chaque essai, ainsi qu'à une mise en place et un contrôle plus efficaces des opérations nécessaires à l'exécution des solutions. Enfin, les résultats révèlent que les sujets ont développé un apprentissage spécifique aux procédures des problèmes répétés, au-delà de l'apprentissage général à la tâche acquis par la pratique à des problèmes différents.

Marie-Christine Ouellet, B.A.
Étudiante

Julien Doyon, Ph.D.
Directeur de recherche

Avant-propos

Je tiens d'abord à remercier chaleureusement mon directeur de recherche, le docteur Julien Doyon, pour son regard éclairé et pour sa confiance et son support constants.

Je suis également reconnaissante envers Joanne Roy pour son aide technique indispensable, sa patience, son enthousiasme, et ses conseils judicieux, ainsi qu'envers Madame Rhonda Amsel qui a généreusement accepté de guider mes analyses statistiques et Gerald Johnsrude qui a élaboré le programme de la Tour de Londres.

Je remercie mes collègues du laboratoire, Martin, Hélène, Isabelle (pour son efficacité), Sonia Bellefleur (pour son aide et son intérêt), Alain, Karyne, Anouk, Cathy, Guy, Mélanie, qui m'ont maintes fois encouragée, aidée, et guidée.

Merci à mes parents, Pauline et Gaston, qui, de loin, ont suivi mon parcours et m'ont toujours offert confiance et appui.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont, volontairement, donné temps et énergie afin de participer à ces études et sans lesquelles ces données n'existeraient pas.

Plus particulièrement, je remercie Philip Jackson qui a su être un complice et un compagnon fidèle et de tous les combats, dont le support et la présence m'ont été essentiels.

Table des Matières

RÉSUMÉ.....	ii
AVANT-PROPOS.....	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	iv
LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
CHAPITRE I: INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
INTRODUCTION.....	2
Problèmes de définition.....	5
Recension des écrits.....	10
L'apprentissage d'habiletés cognitives en neuropsychologie.....	10
Modèles théoriques applicables à l'apprentissage d'habiletés cognitives...	22
Caractéristiques de l'apprentissage d'une habileté cognitive.....	27
PROBLÉMATIQUE DE LA RECHERCHE.....	38
CHAPITRE II : <i>Cognitive skill learning studied using a version of the Tower of London task</i>.....	40
AUTHOR'S NOTE.....	42
ABSTRACT.....	43
INTRODUCTION.....	44
Experiment 1.....	49
Experiment 2.....	61
GENERAL DISCUSSION.....	67
REFERENCES.....	75
CHAPITRE III: CONCLUSION GÉNÉRALE.....	97
BIBLIOGRAPHIE.....	100

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Schematic representation of the setup used to administer the computerized version of the Tower of London Task.....	83
Figure 2.	Examples of problems of the Tower of London at three levels of difficulty: (a) four-move problem, (b) five-move problem, and (c) six-move problem.....	84
Figure 3.	Results showing the mean total time taken to complete the TOL problems in both the RANDOM and SEQUENCE conditions across the five blocks of trials. Vertical lines depict standard errors of the means.....	85
Figure 4.	Results showing the mean initial time taken to complete the TOL problems in both the RANDOM and SEQUENCE conditions across the five blocks of trials.....	86
Figure 5.	Results showing the mean total number of moves needed to complete the TOL problems in both the RANDOM and SEQUENCE conditions across the five blocks of trials.....	87
Figure 6.	Results showing the mean total time taken to complete the TOL problems in both the REPEATED and NON-REPEATED problems across the five blocks of trials.....	88
Figure 7.	Results showing the mean initial time taken to complete the TOL problems in both the REPEATED and NON-REPEATED problems across the five blocks of trials.....	89
Figure 8.	Results showing the mean total number of moves needed to complete the TOL problems in both the REPEATED and NON-REPEATED problems across the five blocks of trials.....	90

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Summary of the experimental design used in Experiment 1.....	91
Tableau 2.	Subject characteristics in the two experimental conditions.....	92
Tableau 3.	Summary of F values corrected with Bonferonni obtained in pairwise comparisons for the three dependent measures in Experiment 1.....	93
Tableau 4.	Summary of the experimental design used in Experiment 2.....	94
Tableau 5.	Summary of F values corrected with Bonferonni obtained in pairwise comparisons for the three dependent measures in Experiment 2.....	95

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction

L'extraordinaire capacité de l'être humain à acquérir de nouvelles habiletés est un sujet des plus fascinants pour ceux qui cherchent à comprendre comment le cerveau humain se forme, se développe, et se remodèle continuellement. Le choix apparemment infini d'activités et de connaissances qui nous entourent nous amène à développer, souvent à notre insu et sans nécessairement qu'on en soit conscient, une panoplie d'habiletés qui nous permettent de résoudre des problèmes, de comprendre certains concepts, ou encore d'interagir de plus en plus efficacement avec notre environnement. Par la pratique de certaines activités, nous arrivons à exécuter des mouvements de façon plus fluide et plus précise, à trouver des solutions plus facilement et efficacement à des problèmes, à jongler avec des connaissances plus aisément dans des buts très spécifiques. En fait, presque tout ce que nous faisons dans une journée, que ce soit répondre au téléphone, écrire une lettre, consoler un ami, calculer une addition, ou encore conduire une voiture, implique nécessairement qu'il y a eu apprentissage d'une habileté ou bien d'un ensemble d'habiletés bien précises.

L'étude scientifique de l'apprentissage d'habiletés (*skill learning*) a débuté au moment où les chercheurs se sont attardés à mieux comprendre les processus qui s'opèrent, tant au niveau comportemental que physiologique, lorsqu'une personne ou un animal acquiert graduellement une habileté. Les chercheurs en neuropsychologie distinguent les habiletés par la nature de l'information acquise dans différentes tâches. D'abord, il y a les habiletés motrices ou visuomotrices (par exemple, apprendre à suivre une cible mobile avec un stylet) où la précision temporelle et spatiale des mouvements est acquise par la pratique (Willingham, 1998). Il existe également les habiletés perceptuelles (par exemple, apprendre à lire un texte présenté à l'envers) où les sujets apprennent à être de plus en plus efficaces à détecter ou à encoder certains stimuli sensoriels (Cohen & Squire, 1980). Enfin, il y a les habiletés de nature cognitive (par exemple, apprendre à jouer aux échecs) qui consistent en l'apprentissage et l'intégration de règles et de procédures mentales (Anderson, 1990). Cette dernière catégorie est sans doute la moins

bien connue et la moins définie en neuropsychologie puisqu'elle englobe à peu près tout ce qui n'est pas moteur ou perceptuel. Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéresserons plus particulièrement à cette catégorie des habiletés cognitives. À ces types d'habiletés étudiés en neuropsychologie, il faut cependant ajouter d'autres genres d'habiletés qui ont fait objet d'études scientifiques en psychologie, soit par exemple les habiletés émotionnelles ou les habiletés sociales, qui sont plus difficile à classer sous la rubrique "d'habiletés cognitives", mais qui impliquent néanmoins une foule de processus cognitifs complexes dont l'apprentissage peut être étudié, comme par exemple les stratégies de communication, d'empathie, ou encore de médiation.

L'origine de l'étude de l'apprentissage des habiletés de nature cognitive en neuropsychologie remonte aux premières expérimentations effectuées dans cette jeune discipline. Après les étonnantes découvertes faites auprès du patient amnésique H.M. (Milner, Corkin, & Teuber, 1968; Scoville & Milner, 1957), les chercheurs ont peu à peu laissé de côté une vision unitaire de la mémoire pour en endosser une conception morcelée, où différents processus sont supportés par des systèmes neurophysiologiques distincts (Mishkin & Appenzeller, 1987; Petri & Mishkin, 1994; Schacter, 1987; Squire, 1992). Deux modèles, ceux de Squire & Zola-Morgan (1991) et de Schacter (1987), sont particulièrement influents dans l'organisation des concepts par rapport à la mémoire. Dans chacun de ces modèles, on retrouve l'idée d'habileté (*skill*), dans l'un sous la rubrique de mémoire non-déclarative (Squire 1992; Squire & Zola-Morgan, 1991), et dans l'autre, sous celle de mémoire implicite (Schacter, 1987, 1990, 1994). Le modèle de Squire offre le terme *mémoire procédurale* pour faire précisément référence aux habiletés, qu'elles soient de nature motrice, perceptuelle, ou encore cognitive. Selon ces auteurs, ces sous-systèmes de mémoire regroupent un ensemble de processus qui ne font pas nécessairement appel à la conscience et par lesquels le comportement est altéré d'une présentation de la tâche à une autre. C'est donc dans le cadre de ces sous-systèmes, mémoire non-déclarative ou implicite, que nous situons le concept d'habileté dans ce mémoire.

L'apprentissage d'habiletés suscite depuis récemment un engouement grandissant auprès des chercheurs qui tentent d'établir les bases neuroanatomiques et

neurophysiologiques de la mémoire. L'intérêt se trouve dirigé en particulier vers les habiletés de type moteur et perceptuel. Une panoplie d'études, tant chez l'animal que chez l'humain, ont exploré les processus et bases neuroanatomiques de ce type de mémoire à l'aide de techniques et de méthodes expérimentales variées (voir Doyon, 1997; Schacter, 1994; Schacter, Chiu, & Ochsner, 1993; Squire & Zola, 1996, pour une recension des écrits). Les habiletés de nature cognitive restent cependant à ce jour à l'arrière-scène.

Si l'on tente de comprendre ce qui a pu freiner les recherches systématiques sur l'apprentissage d'habiletés cognitives, plusieurs explications sont plausibles. D'une part, la très grande diversité des habiletés cognitives peut décourager le chercheur qui, à l'aide d'une seule tâche, tente de tirer des conclusions généralisables à l'ensemble des opérations cognitives apprises dans les activités quotidiennes. En effet, si l'on regarde, par exemple, l'écart entre l'habileté à programmer un ordinateur et l'habileté à animer un groupe de personnes, il nous apparaît clair que ces deux habiletés n'ont rien en commun, et pourtant, nous pouvons les appeler toutes deux des habiletés cognitives. Il s'agit donc ici d'un problème de classification où la catégorie "habiletés cognitives" est beaucoup trop vaste, mais demeure la seule disponible pour différencier les habiletés de nature intellectuelle des habiletés motrices ou perceptuelles. Un deuxième problème qui se pose réside dans la mesure de la performance. Celle-ci s'avère souvent difficile dans les différentes tâches utilisées, car il faut se fier à des indices comportementaux comme la vitesse d'exécution, le nombre d'erreurs, ou encore le temps de réaction, qui reflètent seulement une infime partie des processus cognitifs complexes qui composent l'habileté. Enfin, un autre aspect qui est difficile à contrôler est celui de la variabilité interindividuelle. En effet, lorsqu'il s'agit, par exemple, de demander à différents sujets de trouver une solution à un problème, il est très difficile de structurer la tâche de manière à ce que toutes les personnes réfléchissent de la même manière. Deux sujets peuvent être aussi efficaces l'un que l'autre mais employer des stratégies très différentes qui impliquent des processus cognitifs très variés. Le chercheur doit donc accepter cette variabilité pour tenter d'isoler les aspects généraux de l'apprentissage de la tâche qu'il a choisi d'étudier.

Ainsi, compte tenu de l'importance des apprentissages cognitifs dans le développement humain et la vie quotidienne, le présent mémoire s'est attardé, d'une part, à réviser et à intégrer les concepts théoriques et les recherches scientifiques qui ont trait à l'apprentissage d'habiletés cognitives, et d'autre part, à proposer une nouvelle version de la tâche appelée Tour de Londres (initialement introduite par Shallice [1982]), comme outil pour étudier les processus impliqués dans l'acquisition d'une habileté cognitive. Le contexte théorique débutera avec un survol des problèmes de définition de l'apprentissage d'habiletés cognitives. Suivra ensuite une revue des recherches scientifiques en neuropsychologie qui ont utilisé des tâches cognitives pour étudier l'apprentissage implicite ou procédural de nouvelles habiletés. Par la suite, nous nous tournerons vers quelques modèles cognitifs théoriques afin d'élargir notre champ de connaissances par rapport à l'apprentissage procédural d'habiletés cognitives, et d'établir une structure conceptuelle dans laquelle il est possible de situer les études présentées dans le cadre de ce mémoire. Nous tenterons également de relever certaines questions qui restent obscures par rapport aux caractéristiques des habiletés cognitives. Enfin, nous décrirons la tâche développée et employée dans les études présentées dans ce mémoire, et établirons la problématique de la recherche effectuée.

Problèmes de définition

Pour mieux cerner le domaine qui nous intéresse dans le cadre de ce mémoire, il importe de bien définir le concept d'habileté cognitive. Très peu de définitions sont disponibles en neuropsychologie sur ce sujet. Comme il a été discuté plus tôt, ceci se comprend par le fait que ce concept touche un domaine extrêmement vaste où les tâches sont aussi variées que les processus qu'elles impliquent. S'il est possible de définir séparément certains des processus qui sont impliqués dans une habileté (par exemple la mémoire de travail, la planification, ou encore l'attention sélective), peu d'auteurs se sont attardés à préciser ce qu'est une habileté cognitive. Afin de définir plus clairement ce type d'habileté, nous procéderons d'abord à une revue de quelques définitions du concept

général d'habileté. Ceci nous permettra de mieux nous diriger par la suite vers une description plus globale des habiletés cognitives plutôt que sur vers des définitions spécifiques à des tâches particulières. Enfin, nous tenterons de proposer une définition plus systématique, et ce à l'aide, entre autres, de celles qui sont disponibles sur les habiletés motrices.

Définition de l'habileté

Plusieurs auteurs ont proposé des définitions intéressantes de ce qu'est une habileté. Toutefois, celles-ci sont toutes différentes de par leur contenu et leur complexité. Certaines décrivent des concepts de base essentiels, d'autres, plus élaborées, comportent plus d'information quant aux composantes de l'habileté.

En neuropsychologie, l'apprentissage d'habiletés réfère à l'ensemble des processus qui résultent en une performance améliorée à une tâche par la pratique (Doyon, 1997; Schacter, 1987; Schacter et al., 1993; Squire, 1992; Willingham, 1998). Squire (1992) définit très simplement les habiletés comme *des ensembles de procédures que l'on utilise pour opérer dans l'environnement*. De cette définition, on retient d'abord l'idée de *procédures*. Même si la nature de ces procédures n'est pas elle-même bien précisée, ces dernières impliquent que des processus cognitifs spécifiques sont enclenchés lors de l'acquisition d'une habileté. De plus, Squire introduit l'idée d'*utilisation* de ces procédures dans la vie de tous les jours, ce qui ajoute une dimension active à cette définition: l'habileté est ainsi utilisée afin d'effectuer une activité ou une tâche dans l'environnement. Ceci se rapproche de la pensée de Landa (1983) qui définit l'habileté comme *l'aptitude à appliquer des connaissances qui se manifeste par des actions sur des objets ou des connaissances*. Plusieurs autres auteurs endossent ce point de vue que l'habileté ne se manifeste que lorsque le sujet exécute une tâche (Doyon, 1997; Leplat, 1988; Squire, Knowlton, & Musen, 1993).

Une autre définition de l'habileté, très générale, est proposée par Leplat (1988) dans une revue sur les habiletés cognitives utilisées dans des environnements de travail. Il décrit l'habileté comme *la possibilité acquise par un individu d'exécuter une classe de*

tâches à un niveau d'efficacité élevé. Dans cette définition, on retrouve d'abord clairement l'idée d'activité ou de tâche abordée par Squire ou Landa. Leplat précise néanmoins qu'il peut s'agir d'une *classe* de tâches, ce qui implique qu'une fois que l'habileté est acquise pour une tâche X, elle sera utile pour effectuer une tâche Y, différente en surface mais semblable à la base. Par exemple, l'habileté acquise par un mathématicien à calculer des intégrales lui permet de résoudre divers problèmes différents en surface mais qui requièrent tous le même genre d'opérations cognitives de calcul différentiel. Un autre aspect intéressant de la définition de Leplat réside dans l'idée d'*acquisition*. Ceci indique un changement dans le temps, une construction graduelle de l'habileté par la pratique d'une tâche ou d'une classe de tâches précises. Enfin, Leplat introduit une composante d'*efficacité* indiquant ainsi que l'habileté est un stade d'apprentissage avancé où la tâche est effectuée avec un haut niveau de compétence.

En la distinguant du phénomène d'automatisme, Logan (1985) définit l'habileté de façon très élaborée. La première composante de sa définition recoupe encore une fois l'idée de tâche. Plus précisément, Logan propose que l'habileté fait référence à la performance d'une tâche *complexe*. À cet élément nouveau de complexité, Logan ajoute une description détaillée d'une telle tâche: il propose qu'elle comprend un ensemble de buts ou d'objectifs qu'un sujet tente d'atteindre, accompagné d'un ensemble de contraintes auxquelles le sujet doit s'adapter afin d'arriver à ses objectifs. Certaines contraintes font partie de l'environnement de la tâche elle-même, comme par exemple, des règles qui gèrent le genre d'opérations à effectuer (par exemple, les mouvements permis aux échecs). D'autres contraintes font partie intégrante du sujet lui-même, par exemple, les limites physiques comme la vitesse, la force, ou l'agilité de mouvements, ou encore les limites cognitives ou psychologiques comme celles de la mémoire de travail ou de l'ensemble des connaissances applicables à la tâche.

Les définitions générales de l'habileté discutées ci-dessus constituent un excellent cadre de référence pour bâtir une définition de l'habileté cognitive. D'autres sources théoriques ou empiriques sont néanmoins à considérer afin d'élaborer une définition complète.

Définition de l'habileté cognitive

Il existe plusieurs définitions précises des habiletés motrices ou perceptuelles. Par exemple, Hallett et Grafman (1997) définissent une habileté motrice comme *la capacité de mettre en séquence de manière de plus en plus précise et fluide, une multitude de mouvements complexes impliquant plusieurs articulations*. Willingham (1998), quant à lui, définit l'apprentissage d'habiletés motrices comme *l'amélioration de la précision spatiale et temporelle de mouvements par la pratique*. Toutefois, peu d'auteurs ont proposé des définitions systématiques d'une habileté cognitive. Certains travaux théoriques offrent néanmoins certaines pistes.

C'est sans doute à Anderson (1982, 1983, 1987, 1990) que revient la plus grande contribution théorique sur les habiletés spécifiquement cognitives. Selon sa théorie, le système cognitif est *un ensemble de règles de productions qui utilisent des faits contenus dans une base de connaissances déclaratives* (Anderson, 1982). Anderson a développé un modèle très précis de l'acquisition des habiletés cognitives qu'il définit comme le but ultérieur de plusieurs phases essentielles d'acquisition où les règles de production et les connaissances subissent des changements particuliers. Ce modèle ainsi que ses phases spécifiques seront discutées de façon plus détaillée dans une section subséquente.

Logan (1985) offre également une définition de l'habileté en général qui peut s'appliquer à l'habileté cognitive. Selon cet auteur, une habileté est un amalgame de *procédures automatisées* et de *connaissances déclaratives et métacognitives* qui permettent au sujet de savoir quand et comment utiliser les procédures et connaissances qui sont propres aux complexités de la tâche. En guise d'exemple, Logan décrit l'habileté de la copie dactylographiée. Cette habileté est composée de diverses parties plus ou moins automatisées comme, par exemple, la lecture de mots, la transformation de mots en commandes motrices sur des touches d'un clavier, et la manipulation spatiale et temporelle précise de ces touches. C'est donc l'amalgame de ces processus automatisés qui formerait une habileté. Un aspect marquant de la définition de Logan est donc le caractère composé des habiletés. Celles-ci sont décrites comme une mosaïque de procédures et de connaissances reliées à différents processus plus ou moins automatisés.

En neuropsychologie, aucune définition systématique de l'habileté cognitive n'est disponible. Par contre, certains auteurs ont décrit la nature de certaines tâches cognitives et nous proposent donc certains éléments qui pourraient être considérés dans l'élaboration d'une définition de ce type d'habileté. Par exemple, dans une revue des tests de mémoire implicites, Moscovitch et ses collègues (1993) ont élaboré un modèle dans lequel se retrouvent deux grandes catégories, soit d'un côté les tests à items spécifiques (qui sont généralement associés à la recherche sur l'amorçage ou *priming*), et de l'autre, les tests procéduraux qui se rapportent à l'apprentissage d'habiletés en tant que tel (Moscovitch, Vriezen, & Goschen-Gottstein, 1993). Sous cette catégorie, les tests se répartissent à nouveaux dans deux sous-groupes, soit les tests sensori-moteurs, et les tests basés sur un ordre ou des règles précises (*ordered/rule-based tests*). Même si cette dernière rubrique ne prend pas le nom de tests d'habiletés cognitives, Moscovitch et coll. (1993) donnent comme exemple des tâches (résolution de casse-tête, Tour de Hanoï) qui se retrouvent dans la littérature neuropsychologique sur l'apprentissage d'habiletés cognitives. De plus, les auteurs s'attardent à énumérer quelques-uns des processus *stratégiques* impliqués dans de telles tâches: auto-enregistrement (*monitoring*) ou contrôle de l'information, planification, développement et test d'hypothèses.

En rassemblant les concepts des travaux théoriques discutés plus haut, il est donc possible d'entrevoir l'élaboration d'une définition plus complète de l'habileté cognitive.

Proposition d'une définition de l'habileté cognitive

Plusieurs éléments semblent essentiels. D'abord l'idée de changement dans le temps ou d'acquisition de l'habileté est primordiale. En effet, comme nous allons le voir dans la revue de littérature, la plupart des études dans ce domaine s'intéressent à l'évolution de la performance dans le temps par la pratique. Ensuite il faut, bien sûr, parler de tâche puisque l'habileté se manifeste par une performance à une activité ou à une classe d'activités. Il est ensuite possible d'ajouter l'idée d'un haut niveau de performance atteint pendant le processus d'acquisition ou par la pratique. De plus, il faut préciser quelles sont les unités de base de l'habileté, soit les effecteurs ou les processus en

jeu. Enfin, de façon essentielle il faut introduire l'idée que c'est un amalgame complexe, structuré, et cohérent de ces divers processus qui formera l'habileté. Si l'on tente donc d'englober ces idées en une seule définition, il est possible de proposer que:

L'habileté cognitive est la capacité acquise par la pratique d'utiliser, avec un haut niveau d'efficacité et de fluidité, un agencement complexe et précis de procédures, règles, connaissances déclaratives, et autres processus cognitifs, pour exécuter une tâche (ou une classe de tâches).

Cette définition demeure très générale, mais considérant l'étonnante diversité des habiletés cognitives, elle permet néanmoins d'en faire ressortir les points essentiels. Chaque habileté cognitive pourra ensuite, comme pour différentes habiletés motrices, être décrite de façon plus précise quant aux tâches par lesquelles elle se manifeste et quant aux processus cognitifs (par exemple la mémoire de travail ou la planification) qu'elle implique.

Recension des écrits

Dans cette section, nous tenterons de revoir en détail les études qui se sont intéressées à l'apprentissage d'habiletés cognitives. Nous décrirons d'abord les études neuropsychologiques qui ont tenté de mesurer l'apprentissage d'habiletés cognitives chez diverses populations cliniques. Puis nous élargirons notre champ de connaissances en intégrant plusieurs ouvrages en psychologie cognitive qui offrent des modèles et des cadres théoriques intéressants pour l'étude des habiletés cognitives.

L'apprentissage d'habiletés cognitives en neuropsychologie

En neuropsychologie, la recherche sur l'apprentissage d'habiletés a été lancée dans les années 60 avec l'observation des capacités d'apprentissage préservées chez le patient amnésique H.M. (Milner et al., 1968). Après d'intenses recherches sur la mémoire déclarative et son substrat neuroanatomique dans les structures médiales du lobe

temporal, les chercheurs se sont intéressés de plus en plus aux bases neurophysiologiques de l'apprentissage d'habiletés, en particulier motrices et visuomotrices (Mishkin & Appenzeller, 1987; Squire, 1992). Il devient de plus en plus apparent que les principaux acteurs dans ce type d'apprentissage sont les noyaux gris centraux, le cervelet, et les structures corticales qui leur sont associées (Daum et al., 1992a, 1992b; Pascual-Leone et al., 1993; Phillips & Carr, 1987; Saint-Cyr, Taylor, & Lang, 1988). Plusieurs données démontrent que les patients porteurs d'une lésion dans ces régions cérébrales ont des déficits d'apprentissage procédural, alors que des patients amnésiques, suite à une lésion du système limbique ou du diencephale, ne démontrent pas de difficultés à ce type de mémoire. Si cette dissociation fonctionnelle est bien documentée pour ce qui est des habiletés motrices ou perceptuelles, les données supportant une telle dissociation pour les habiletés cognitives demeurent encore limitées. Les études existantes auprès de plusieurs populations cliniques suggèrent, toutefois, qu'elle s'applique également aux habiletés cognitives.

Apprentissage d'habiletés cognitives chez les patients amnésiques

Plusieurs recherches auprès de patients souffrant d'amnésie d'étiologies différentes ont permis de démontrer certaines capacités résiduelles d'apprentissage sur des tâches de nature cognitive. Ces études suggèrent fortement une dissociation entre la capacité d'apprendre de nouvelles informations déclaratives et la possibilité d'acquérir de nouvelles habiletés cognitives (voir Gabrieli, 1998, ou Squire & Zola, 1996, pour une recension des écrits).

Par exemple, dans une étude clé sur la mémoire procédurale, Cohen et Squire (1980) ont été les premiers à suggérer qu'une habileté autre que motrice ou visuomotrice peut-être acquise par des patients amnésiques. Ces chercheurs ont introduit un nouveau type de tâche, la lecture-miroir et ont démontré un apprentissage normal de huit patients amnésiques de cette habileté d'analyse visuelle, suggérant que le système neuronal affecté chez leurs patients n'est pas nécessaire à l'apprentissage de procédures, d'opérations et de règles qui sous-tendent l'acquisition d'habiletés qui ne sont pas perceptuelles ou motrices

de nature. Même si la lecture-miroir est maintenant considérée comme une tâche d'apprentissage d'habileté *perceptuelle* plutôt que cognitive (Cohen, Eichenbaum, Deacedo, & Corkin, 1985; Schacter, 1987; Squire, 1992; Squire et al., 1993), l'étude de Cohen et Squire demeure l'une des premières qui étendent nos connaissances des habiletés préservées chez les amnésiques au delà des habiletés motrices ou des effets d'amorçage (*priming*). Ce sont ces auteurs qui, d'ailleurs pour la première fois, ont introduit l'idée maintenant populaire de dissocier le "savoir-comment" (*knowing how*) du "savoir-quoi" (*knowing what*).

Des études plus anciennes (Brooks & Baddeley, 1976; Corkin, 1965; Milner et al., 1968) ont proposé les premières tâches qui impliquent des processus cognitifs complexes. Par exemple, on soumettait des patients amnésiques à plusieurs essais de tâches de labyrinthes ou d'assemblage de casse-tête. Ces deux types de tâches impliquent d'une part de la coordination visuomotrice, mais également des processus cognitifs complexes d'organisation et de planification visuospatiale. Corkin (1965) a rapporté un apprentissage de la part du patient H.M. sur des labyrinthes tactiles simplifiés. De plus Brooks et Baddeley (1976) ont démontré que cinq patients amnésiques pouvaient apprendre et retenir les labyrinthes de Porteus (*Porteus Mazes*) après vingt essais de pratique répartis sur deux sessions espacées d'une semaine. Ces mêmes patients démontraient également un apprentissage normal à des casse-tête. Dans cette étude, les patients effectuaient à six reprises un même casse-tête et l'on mesurait le temps mis pour compléter chaque essai d'apprentissage. En plus de démontrer une courbe d'apprentissage normale, les patients avaient un niveau de rétention équivalent aux normaux dans une deuxième session ayant lieu après un délai d'une semaine. De façon intéressante, les chercheurs ont mesuré le niveau de transfert à un nouveau casse-tête dans cette deuxième session d'évaluation. Cette mesure leur permettait de comparer le niveau d'apprentissage à un casse-tête spécifique à l'amélioration générale à la tâche d'assemblage des casse-tête de ce type. Les résultats n'ont cependant pas démontré d'effet de transfert. L'idée de dissocier un apprentissage spécifique d'un apprentissage général à une tâche est donc introduite ici pour la première fois. Cette dissociation sera d'autant plus importante dans la structure des études présentées dans le cadre de ce mémoire.

Une des premières tâches cognitives employées dans le domaine de l'apprentissage procédural est la Tour de Hanoï (Anzai & Simon, 1979), une tâche complexe de résolution de problèmes qui consiste à déplacer des disques de grandeur différentes sur trois tiges afin de reproduire une configuration précise. La Tour de Hanoï est, à ce jour, la tâche sans doute la plus populaire dans la littérature neuropsychologique pour étudier l'apprentissage d'habiletés cognitives. Compte tenu que la Tour de Hanoï fait appel à des processus similaires à ceux qui sont sollicités par la Tour de Londres qui fait l'objet du présent mémoire, nous nous attarderons à expliquer plus en détail cette épreuve, et les résultats d'études qui l'ont employée.

Le but de l'épreuve de la Tour de Hanoï est de transférer des disques (au minimum trois) d'une position initiale à une position finale en faisant le moins d'erreurs possible et en effectuant le moins de déplacements possible. Certaines règles régissent la nature des déplacements permis. Par exemple, le sujet ne peut déplacer qu'un seul disque à la fois. De plus, un disque plus grand ne peut jamais être placé au-dessus d'un disque plus petit, de sorte que dans la version à cinq disques, la tâche requiert un minimum de 31 étapes afin d'arriver à la solution. Cette tâche est utilisée dans le domaine de l'apprentissage d'habiletés pour plusieurs raisons. D'abord, elle est intéressante puisqu'elle peut être résolue à différents niveaux de complexité, en faisant varier le nombre de disques utilisés, faisant ainsi appel à des stratégies différentes pour chaque différent niveau de difficulté. Avec la pratique, les sujets apprennent à résoudre le problème avec de plus en plus d'efficacité, c'est-à-dire en réduisant le nombre d'erreurs et de mouvements superflus. Ainsi, il est possible de présenter au sujet la Tour de Hanoï à plusieurs reprises et donc de mesurer l'acquisition de l'habileté à résoudre ce type problème (Cohen et al., 1985).

Cohen et ses collaborateurs (1985) ont été les premiers à documenter que des patients amnésiques avec de grands déficits de mémoire et d'apprentissage démontrent une dissociation marquée entre les processus de mémoire qui supportent l'apprentissage d'habiletés cognitives et ceux qui supportent l'apprentissage de nouveaux faits ou données. Dans cette étude, un groupe de patients amnésiques et un groupe de sujets sains effectuaient quatre sessions de pratique de la Tour de Hanoï (version à cinq disques) en

complétant quatre essais d'apprentissage à chaque fois. Les résultats de cette étude ont démontré (1) que les patients amnésiques peuvent apprendre normalement la Tour de Hanoï, c'est-à-dire qu'ils font de moins en moins d'erreurs et effectuent de moins en moins de déplacements superflus, tout comme les sujets sains, (2) que l'habileté de patients ou des sujets sains à résoudre le problème n'est pas fidèle à leur capacité d'expliquer *verbalement* comment ils résolvent le problème, et enfin (3) que les sujets amnésiques, comme les sujets sains, peuvent effectuer la tâche de manière efficace, et ce même lorsqu'ils doivent compléter la tâche à partir de configurations initiales différentes. Cette étude met en relief deux éléments qui seront essentiels dans les études décrites dans ce mémoire: d'une part elle suggère une dissociation entre l'habileté acquise et la possibilité de verbaliser ou d'expliquer cette habileté, et d'autre part, elle introduit la notion de généralisation de l'habileté en indiquant que les sujets ont acquis la capacité de compléter la tâche à partir de différentes positions. Ce dernier aspect est intéressant car il démontre que l'habileté acquise est relativement flexible puisqu'elle permet au sujet d'utiliser les mêmes procédures et stratégies avec des positions initiales variées.

Plusieurs auteurs ont relativisé les résultats décrits plus haut et suggèrent que l'apprentissage procédural cognitif n'est peut-être pas totalement préservé chez tous les amnésiques. Par exemple, une étude par Beatty et ses collaborateurs chez un patient amnésique montre que, malgré un apprentissage significatif de la tâche de lecture-miroir ainsi que de la Tour de Hanoï, le sujet n'atteint toutefois pas une performance normale (Beatty et al., 1987). Ces auteurs proposent donc que lors d'une amnésie, l'apprentissage procédural peut ne pas être complètement préservé chez certains patients.

Dans la même veine, une étude récente par Schmidtke, Handschu, et Vollmer (1996) suggère que les patients amnésiques sont retardés dans leur apprentissage de tâches cognitives à cause de difficultés à faire la transition vers des stades d'acquisition de l'habileté plus avancés, probablement à cause d'une plus importante contribution de la mémoire déclarative dans les premiers stades de l'apprentissage. Ces résultats concordent bien avec le modèle d'Anderson (1982) qui stipule que l'habileté cognitive est acquise en deux phases, une *déclarative* et l'autre *procédurale*. Les patients amnésiques auraient donc plus de problèmes à ce premier stade d'acquisition. Cette disparité entre les sujets

amnésiques et les sujets normaux s'expliqueraient donc par une plus grande contribution de la mémoire déclarative dans les premières phases d'acquisition des habiletés cognitives par rapport aux habiletés motrices ou perceptuelles.

Dans une étude auprès de patients amnésiques ainsi qu'auprès d'autres patients atteints de la maladie de Huntington, Butters et ses collaborateurs n'ont pas été en mesure de démontrer un apprentissage procédural de la Tour de Hanoï chez leurs sujets amnésiques (Butters, Wolfe, Martone, Granholm, & Cermak, 1985). Par contre il faut considérer que ces derniers étaient, en majorité, des patients atteints de la maladie de Korsakoff et que le dommage aux régions préfrontales contribuait de façon significative à leurs déficits mnésiques (Pinel, 1993). Toutefois, certaines données indiquent que lorsque la tâche est adaptée à ce type de patient et qu'une aide adéquate est fournie pour compenser les déficits de mémoire déclarative et de mémoire de travail, l'apprentissage procédural est préservé (Gabrieli, Keane, & Corkin, 1987; Beaunieux et al., 1998). Ces données soulignent l'influence potentielle de différentes pathophysiologies sur les capacités d'apprentissage préservées de patients amnésiques.

Ces études sur la Tour de Hanoï soulèvent un problème fondamental des tâches d'apprentissage d'habiletés cognitives, soit celui de la difficulté à dissocier les composantes procédurales et déclaratives. En effet, à la lumière du modèle d'Anderson (1982, 1990), il est essentiel de considérer l'apport significatif de la mémoire déclarative dans ce type de tâche, surtout aux premiers stades d'apprentissage. En général, les chercheurs considèrent que si une tâche peut être apprise par un patient amnésique, elle est donc procédurale. La nuance qu'il est important d'apporter ici, toutefois, est que cette tâche n'est peut-être pas *purement* procédurale mais qu'elle peut aussi avoir certaines composantes déclaratives.

D'autres types de tâches ont été employés comme outils pour étudier l'apprentissage d'habiletés cognitives de patients amnésiques. Dans une série d'études utilisant la méthode des *vanishing cues*, Glisky et ses collaborateurs ont démontré que des amnésiques peuvent acquérir certaines habiletés à manipuler un ordinateur, mais à un rythme en deçà de la normale (Glisky, Schacter, & Tulving, 1986; Glisky & Schacter, 1988, 1989). Squire & Frambach (1990) ont utilisé une tâche complexe dans laquelle des

sujets sains et amnésiques devaient tenter de prédire combien de travailleurs seraient nécessaires dans une usine fictive pour maintenir un niveau de production spécifique. Si les prédictions leur semblaient d'abord aléatoires, les deux groupes de sujets se sont néanmoins améliorés significativement à l'aide de renforcement adéquat. Les patients amnésiques acquièrent donc cette habileté aussi bien que les sujets sains, tant que la stratégie spécifique ne devient pas déclarative pour ces derniers. En effet, lorsque les sujets sains découvrent et viennent à connaître de façon *explicite* la stratégie qui leur permet de faire les prédictions exactes, leur performance dépasse celle des patients amnésiques qui ne peuvent profiter de cet avantage.

D'autres chercheurs encore ont enseigné à des patients amnésiques des habiletés d'arithmétique complexes, comme mettre mentalement deux nombres au carré. Certains patients ont appris normalement à utiliser un algorithme (Charness, Milberg, & Alexander, 1988; McGlinchey-Berroth, Milberg, & Charness, 1989), alors que d'autres ont démontré un déficit à combiner les composantes individuelles de l'algorithme (Milberg, Alexander, Charness, McGlinchey-Berroth, & Barrett, 1988). Ces études concordent avec l'idée que l'apprentissage procédural cognitif n'est peut-être pas complètement préservé chez tous les patients amnésiques (Beatty et al., 1987).

Enfin, certains chercheurs se sont penchés sur l'apprentissage de règles de grammaire artificielle (*artificial grammars*) et ont démontré qu'il est possible pour des patients amnésiques d'apprendre implicitement, et ce aussi bien que des sujets sains, des règles et des connaissances spécifiques par rapport à la structure de séries de lettres (Knowlton, Ramus, & Squire, 1992; Knowlton & Squire, 1994, 1996). Il demeure toutefois incertain que l'apprentissage de règles grammaticales artificielles soit réellement celui d'une habileté cognitive. En effet, il est possible que cette forme d'apprentissage dépende de processus semblables à ceux qui sont engagés dans l'amorçage perceptuel (Squire & Zola, 1996). De plus, certaines données indiquent que des patients atteints de la maladie de Huntington apprennent normalement ce type de tâche (Knowlton, Squire, Paulsen, Swerdlow, & Swenson, 1996). Puisque ces derniers démontrent habituellement un déficit d'apprentissage de diverses habiletés, ces données mettent donc en doute

l'appartenance de l'acquisition des règles de grammaire artificielle à la catégorie des habiletés cognitives.

Apprentissage d'habiletés cognitives chez les patients avec lésions aux noyaux gris centraux

De nombreuses études, tant chez l'humain que chez l'animal, indiquent que les noyaux gris centraux (noyau caudé, putamen, globus pallidus) contribuent de manière significative aux processus impliqués dans l'acquisition d'habiletés (voir Doyon, Owen, Petrides, Sziklas, & Evans, 1996; Moscovitch, et al., 1993; Saint-Cyr & Taylor, 1992; Wise, 1996, pour une recension des écrits). Les études qui se sont penchées sur des habiletés spécifiquement cognitives ont employé des tâches similaires à celles qui ont été utilisées chez des patients amnésiques. Cette fois, les populations privilégiées de patients sont celles qui sont atteintes d'une part de la maladie d'Huntington qui cible en particulier le noyau caudé, et d'autre part, de la maladie de Parkinson qui entraîne une dégénérescence de la voie dopaminergique nigro-striatale.

Dans une étude mentionnée plus tôt par Butters et ses collaborateurs (1985), des patients à un stade avancé de la maladie de Huntington ont démontré un déficit à apprendre les procédures associées à la Tour de Hanoï, et ce même après 16 essais d'apprentissage. Ces résultats ne sont néanmoins pas clairs car ces chercheurs n'ont pas été en mesure de montrer une double dissociation entre la performance de leurs patients amnésiques (principalement atteints de la maladie de Korsakoff) et celle de patients souffrant de la maladie de Huntington. Par contre, il est clair que la performance de ces derniers, à un stade avancé de la maladie, est affectée par rapport aux sujets normaux.

Les résultats de Butters et collaborateurs (1985) sont appuyés par ceux de Saint-Cyr et ses collègues (1988) qui ont utilisé une version de la Tour de Hanoï (la Tour de Toronto) développée dans leur laboratoire. Ces chercheurs ont étudié les capacités d'apprentissage procédural cognitif chez 24 patients dans les phases initiales de la maladie de Parkinson, ainsi que chez 12 sujets atteints de la maladie de Huntington, huit d'entre eux au début de la maladie et quatre autres dans des phases plus avancées. Les résultats indiquent que le néostriatum ainsi que les structures qui lui sont associées (par

exemple, le cortex préfrontal) forment un circuit essentiel à l'acquisition de procédures cognitives. Les patients atteints de la maladie de Parkinson ainsi que ceux qui sont aux phases initiales de la maladie de Huntington démontrent un déficit à l'apprentissage de la Tour de Toronto, mais leur performance demeure normale sur des tests de mémoire déclarative. Dans les phases plus avancées de la maladie de Huntington, les patients démontrent à la fois des difficultés dans l'apprentissage de l'habileté cognitive et des déficits importants dans les tâches de mémoire déclarative. Ces auteurs sont les premiers à documenter une telle dissociation.

Deux études récentes corroborent les résultats précédents. D'une part Daum et ses collaborateurs ont montré que des patients atteints de la maladie de Parkinson aux phases initiales et avancées de la maladie présentent un déficit d'apprentissage procédural d'une version simplifiée de la Tour de Hanoi (Daum, Schugens, Spieker, Poser, Schonle, & Birbaumer, 1995). D'autre part, une étude par Roncacci, Troisi, Carlesimo, Nocentini et Caltagirone (1996) a comparé la performance de 18 patients parkinsoniens à celle de 20 sujets sains durant l'apprentissage de deux habiletés, une visuoperceptuelle (la lecture-miroir), l'autre cognitive (l'assemblage de casse-tête). Ces chercheurs ont ajouté une dimension intéressante à leur étude en comparant la performance de leurs sujets lorsque (1) des stimuli différents étaient présentés pendant les essais d'apprentissage, ou (2) lorsque les mêmes stimuli étaient répétés pendant l'apprentissage. Les auteurs proposent que la capacité d'apprendre les stimuli répétés devrait davantage être basée sur des stratégies explicites, et aiderait donc les sujets à bénéficier de connaissances déclaratives pour améliorer leur performance. De manière intéressante, les résultats indiquent que les patients atteints de la maladie de Parkinson ont des déficits marqués à apprendre les procédures reliées à la tâche, que les stimuli soient répétés ou non. Selon ces auteurs, ils ne peuvent donc pas profiter d'un avantage apporté par des stratégies explicites, puisqu'ils ne peuvent acquérir l'habileté elle-même. Il n'est malheureusement pas précisé dans cette étude si la performance des sujets sains était significativement améliorée sur les items répétés. Malgré la proposition intéressante de Roncacci et ses collaborateurs (1996), il demeure donc incertain que même des sujets sains bénéficient de la répétition d'items. De plus, il n'est pas indiqué si les sujets étaient prévenus, avant même de faire la

tâche, que certains items se répéteraient. Dans cette étude il était peut-être facile pour les sujets de se rendre compte qu'ils effectuaient le même casse-tête ou lisaient le même mot. Mais qu'en est-il d'une tâche (1) où les sujets ne sont pas prévenus que certains stimuli seront répétés, et (2) où il n'est en général pas évident de reconnaître un stimulus par rapport à un autre ? Les études présentées dans ce mémoire tenteront de clarifier ces aspects.

Études suggérant un rôle potentiel du cervelet dans l'apprentissage d'habiletés cognitives.

Une quantité grandissante d'études s'intéresse au rôle du cervelet dans la cognition, dont l'apprentissage procédural (voir Doyon, 1997, pour une recension des écrits). Par contre, très peu d'entre elles ont étudié spécifiquement le rôle du cervelet dans l'acquisition d'habiletés cognitives. En 1986, Leiner, Leiner, & Dow proposent que si le cervelet est impliqué dans l'acquisition d'habiletés motrices en exécutant des programmes moteurs sur des muscles ou des articulations, il est plausible que cette même structure puisse exécuter des programmes "cognitifs" sur des données mentales ou conceptuelles. Même si ces auteurs parlent d'habiletés mentales (*mental skills*), il est raisonnable de rapprocher leur discours des habiletés cognitives.

Plusieurs recherches récentes corroborent ce point de vue. Dans une étude à l'aide de la résonance magnétique fonctionnelle, Kim, Ugurbil et Strick (1994) ont noté une activation plus prononcée du noyau dentelé du cervelet de façon bilatérale lorsque leurs sujets tentaient de résoudre une tâche cognitive complexe (qu'ils appellent *the Insanity Task*). La pratique limitée à la tâche dans cette étude ne nous renseigne néanmoins que peu sur l'apprentissage de l'habileté. Par contre, Fiez, Petersen, Cheney et Raichle (1992) ont rapporté un net déficit à l'apprentissage de la Tour de Toronto chez un patient avec une lésion cérébelleuse droite. Selon les auteurs, la performance de leur sujet est équivalente à celle de patients dans la phase avancée de la maladie de Huntington observés par Saint-Cyr et ses collaborateurs (1988) sur cette même tâche. Il n'est pas clair, cependant, si ces déficits étaient dus à des difficultés au niveau de l'apprentissage



en tant que tel ou au niveau de la planification. En effet, une étude par Grafman et ses collaborateurs (1992) a subséquemment démontré un déficit de la planification chez douze sujets avec atrophie cérébelleuse. Par contre, Daum et ses collaborateurs n'ont trouvé un déficit d'apprentissage procédural à la Tour de Hanoï que chez leurs patients avec lésions cérébelleuses accompagnées de lésions du tronc cérébral, mais non chez les patients avec des lésions circonscrites au cervelet (Daum, Ackermann, Schugens, Reimold, Dichgans, & Birbaumer, 1993).

Des études effectuées dans notre laboratoire ont suggéré que des patients porteurs de lésions au cervelet démontraient des déficits à apprendre des règles logiques tels que mesurés avec une version du Digital Logic Gates Test (Carlson, Sullivan, & Schneider, 1989) ou par une adaptation du jeu *Mastermind* (Brodeur, 1996). Toutefois, ces résultats n'ont pas encore été reproduits.

En conclusion, plusieurs données appuient l'idée de plus en plus populaire que le cervelet joue un rôle qui s'étend au-delà du domaine moteur (Bracke-Tolkmit, et al., 1989; Leiner et al., 1986; Schmahmann, 1997). Par contre le rôle spécifique du cervelet dans l'apprentissage d'habiletés cognitives en soi demeure obscur et toutes les études ne concordent pas.

Études chez d'autres populations cliniques

L'apprentissage d'habiletés cognitives à été également étudié chez les schizophrènes (Goldberg, Saint-Cyr, & Weinberger, 1990; Gras-Vincedon et al., 1994; Schmand, Brand, & Kuipers, 1992) et suggère que l'apprentissage procédural est généralement préservé mais contaminé par des difficultés chez ces patients au niveau des capacités de résolution de problèmes (par exemple sur la Tour de Toronto ou la Tour de Hanoï).

Danion et ses collègues (1992) documentent un effet d'interférence de la chlorpromazine (un antagoniste de la dopamine) dans l'acquisition d'une habileté cognitive (la Tour de Toronto). Leurs résultats suggèrent une dissociation des systèmes neurochimiques qui sous-tendent l'apprentissage d'habiletés cognitives de ceux qui sont

responsables de l'effet d'amorçage. Ces données concordent avec d'autres acquises auprès de patients atteints de la maladie de Parkinson puisque cette dernière se caractérise par une carence en dopamine au niveau du neostriatum (Pinel, 1993).

D'autres études encore se sont attardées à comparer l'apprentissage d'habiletés cognitives chez des adultes jeunes et des adultes plus âgés (Strayer & Kramer, 1994; Vakil & Agmon-Ashkenazi, 1997) et suggèrent que même si la performance des sujets plus âgés est en général moins bonne que celle des sujets plus jeunes, l'apprentissage en tant que tel est similaire.

En résumé, les études neuropsychologiques auprès de diverses populations décrites dans cette section nous suggèrent un substrat neuroanatomique potentiel de l'apprentissage d'habiletés cognitives. Il est cependant essentiel de préciser que toutes les habiletés cognitives n'étant pas équivalentes, des différences dans le support neuroanatomique de différentes habiletés existent probablement et restent à être explorées. Les habiletés langagières, par exemples, feront sans doute appel à des structures très différentes que les habiletés de résolution de problèmes. Par contre, à la lumière des études révisées plus tôt, il existe peut-être des bases communes à ces apprentissages.

Les données neuropsychologiques sont intéressantes dans la mesure où elles nous renseignent sur les bases neuroanatomiques qui sous-tendent l'acquisition d'habiletés cognitives. Par contre, elles nous renseignent peu sur les différents processus qui composent l'habileté. Par exemple, les patients parkinsoniens sont-ils affectés dans leur capacité à mettre en séquence les différentes composantes de l'habileté, sont-ils incapables d'utiliser efficacement des stratégies déclaratives au début de l'apprentissage, ou encore ont-ils de la difficulté à consolider les stratégies et procédures en unités de plus en plus efficaces ? Il importe donc d'aller un peu plus loin dans l'étude des habiletés cognitives pour bien comprendre les mécanismes qui supportent leur acquisition. Des travaux plus théoriques, dont nous traiterons dans la prochaine section, nous permettront de mieux comprendre ces mécanismes puisqu'ils procurent une structure conceptuelle essentielle à toute étude de l'apprentissage d'habiletés, et particulièrement d'habiletés cognitives.

Modèles théoriques applicables à l'apprentissage d'habiletés cognitives

Le but de cette section est de discuter brièvement des modèles qui décrivent l'acquisition d'habiletés cognitives afin d'établir une base théorique aux études présentées dans ce mémoire. Ces modèles sont variés dans leur complexité ainsi que dans les processus qu'ils mettent en valeur. Certains se penchent sur les unités de base de l'habileté, d'autres encore tentent d'expliquer la nature des processus qui transforment ces unités au cours de l'apprentissage. Plusieurs décrivent des processus qui sont différents au début de l'apprentissage, dans la phase rapide de l'acquisition d'une habileté, et dans les stades plus avancés d'apprentissage où celui-ci est généralement plus lent. Certains modèles, comme ceux de Fitts et d'Anderson, traitent explicitement d'apprentissage d'habiletés cognitives. D'autres, comme ceux de Logan ou de Shiffrin et Schneider, abordent l'apprentissage de manière indirecte, en se concentrant sur une problématique spécifique du processus d'acquisition, comme par exemple l'automatisation. L'intégration des contributions de ces différents modèles permet de se forger une vision plus globale de l'habileté cognitive.

Le modèle de Fitts

Fitts divise l'apprentissage d'une habileté en trois étapes: un stade *cognitif*, un stade *associatif* et un stade *autonome* (Fitts, 1964; Fitts & Postner, 1967). Dans la première phase (cognitive), le sujet acquiert une compréhension initiale des caractéristiques de l'habileté sous forme d'informations et de connaissances pertinentes au domaine général de la tâche. Ceci lui permet de générer des comportements nécessaires à une performance grossière et approximative de la tâche. Cette phase d'apprentissage est souvent accompagnée de *médiation verbale* où le sujet se répète l'information pertinente lors de l'exécution de la tâche (par exemple les règles explicites qu'on lui a exposées avant de commencer la tâche). Suit ensuite le stade *associatif* où la performance à l'habileté devient de plus en plus fluide: les erreurs sont graduellement détectées et éliminées, et la médiation verbale est peu à peu abandonnée. Le troisième stade du modèle de Fitts consiste en une phase *autonome* où l'habileté continue à se

consolider. On note une amélioration graduelle et continue de la performance qui peut durer indéfiniment.

Le modèle d'Anderson

C'est à Anderson que l'on doit sans doute les travaux les plus systématiques sur l'apprentissage d'habiletés cognitives (Leplat, 1988). Basé en partie sur les idées de Fitts (1964), le modèle d'Anderson (Anderson, 1982, 1983, 1990) propose plusieurs phases spécifiques d'apprentissage pendant lesquels des processus précis sont à l'œuvre. Appuyé par de multiples expériences (par exemple, Anderson & Fincham, 1994; Anderson, Fincham, & Douglass, 1997) ce modèle est parfois utilisé pour faire des prédictions quant aux processus impliqués dans l'apprentissage procédural, par exemple le rôle de la mémoire de travail (Carlson, Sullivan, & Schneider, 1989; Woltz, 1988), ou encore pour étudier les contributions distinctes des différentes phases de l'apprentissage d'une habileté (Charness & Campbell, 1988). Une variété de tâches a été employée dans ces études, allant du calcul mental (Charness et al., 1988; Charness & Campbell, 1988; McGlinchey-Berroth et al., 1989) à l'application de règles séquentielles (Woltz, 1988), en passant par des tâches de portes logiques (*logic gates*) (Carlson et al., 1989).

Le modèle d'Anderson ressemble conceptuellement à celui de Fitts (1964). Toutefois, il a l'avantage de préciser la nature des processus qui peuvent opérer à chacun des stades d'apprentissage. Selon Anderson, l'apprentissage d'une nouvelle habileté cognitive se fait en deux phases principales, une *déclarative* et l'autre *procédurale* (Anderson, 1982). La phase *déclarative* d'Anderson correspond au stade *cognitif* proposé par Fitts. Dans cette phase, le sujet encode les faits et connaissances concernant le domaine de l'habileté. Ces connaissances sont utilisées pour guider le comportement. Si l'utilisation des connaissances sous forme déclarative permet une certaine flexibilité, elle n'en coûte pas moins cher en termes de temps et de capacité de mémoire de travail (Anderson, 1983). Après la phase déclarative, on passe ainsi à la phase procédurale en construisant des *procédures* pour effectuer des tâches spécifiques. Dans ce modèle la transition entre ces deux phases est d'une importance capitale puisque c'est pendant cette

transition que les connaissances sont *compilées* en procédures. Le processus de *compilation* proposé par Anderson correspond au stade *associatif* de Fitts, et comporte deux sous-processus: la *composition*, où les différentes règles ou étapes de la tâche sont condensées en procédures plus efficaces (ceci est semblable au concept de regroupement ou *chunking* proposé par Newell et Rosenbloom discuté plus loin), et la *procéduralisation*, où les connaissances déclaratives ne sont désormais plus nécessaires et ne monopolisent donc plus la mémoire de travail. Lorsque les règles de production de la tâche ont été transformées par le processus de compilation, l'habileté continue à se consolider, se raffine et s'ajuste (*tuning*) permettant ainsi une amélioration continue de la performance. Cette phase se rapproche du stade *autonome* du modèle de Fitts. Selon Anderson (1982, 1990), trois processus sont à la base de cette amélioration soutenue: la *généralisation* (où les procédures peuvent être appliquées dans différentes situations), la *discrimination* (où certaines procédures sont favorisées par rapport à d'autres selon la situation), et le *renforcement* (où les meilleures procédures sont renforcées et les moins bonnes sont affaiblies).

En résumé, selon Anderson, l'apprentissage d'une habileté consiste à transformer des connaissances déclaratives en procédures qui peuvent être appliquées rapidement et automatiquement dans des situations spécifiques (Eysenck & Keane, 1993). Ce modèle est intéressant puisqu'il intègre à la fois les composantes déclaratives et procédurales des habiletés. Ceci est d'autant plus important pour les habiletés cognitives que la plupart d'entre elles nécessitent un apprentissage explicite des règles au début de l'apprentissage. Par exemple, le joueur novice aux échecs se répétera les règles qu'on a tenté de lui inculquer et réfléchira de manière explicite et consciente aux possibilités qui s'offrent à lui. Par contre, le joueur expert n'aura pas nécessairement à utiliser ces connaissances déclaratives pour choisir les mouvements de pièces à effectuer.

Le modèle de Newell & Rosenbloom

Newell et Rosenbloom proposent que les habiletés sont acquises par le processus de regroupement ou *chunking* de stimuli (Newell & Rosenbloom, 1981; Rosenbloom &

Newell, 1986). Il est possible de rapprocher ce processus de celui de *composition* abordé dans le modèle d'Anderson où différentes règles de production de la tâche sont condensées en procédures. Selon Newell et Rosenbloom, le sujet acquiert des réponses à des patrons de stimuli ou des regroupements de stimuli (*chunks*). Ces réponses sont exécutées chaque fois que le patron ou le regroupement de stimuli est présenté. De petits regroupements de stimuli sont d'abord formés, permettant ainsi l'encodage des éléments simples de la tâche. Au début de l'apprentissage, le sujet bénéficie de ces petits regroupements car il sont présentés à plusieurs reprises, entraînant une amélioration rapide de la performance. Par la suite, le sujet bénéficie de moins en moins de la présentation de ces regroupements simples. Il ou elle doit graduellement apprendre à effectuer des réponses sur la base de plus grands regroupements d'information, plus complexes, et plus nombreux. L'amélioration de la performance est donc plus lente puisque les regroupements complexes de stimuli sont présentés moins souvent et sont plus difficiles à encoder. Selon Newell et Rosenbloom (1981), la performance à une habileté suit une fonction mathématique précise qui est directement dépendante de la pratique de la tâche .

Ce modèle est intéressant puisqu'il considère la complexité de la tâche par laquelle se manifeste l'habileté. Par exemple, le joueur d'échecs novice apprendra d'abord à traiter les aspects les plus simples de la tâche, comme la manière de déplacer les pièces sur le jeu. Par la suite, avec la pratique, des stimuli beaucoup plus complexes, par exemple une certaine configuration de l'échiquier, susciteront des réponses spécifiques, comme un déplacement en particulier.

Le modèle de Shiffrin et Schneider

Shiffrin et Schneider proposent que deux types de processus de traitement de l'information régissent la performance à une tâche et se modifient en fonction du niveau d'habileté acquis (Shiffrin & Schneider, 1977; Schneider & Shiffrin, 1977). On retrouve, d'une part, le *traitement automatique*, qui est rapide, s'effectue en parallèle, requiert peu d'efforts, et n'est pas limité par la mémoire à court-terme ou la mémoire de travail. De

plus ce type de traitement n'est pas sous le contrôle direct du sujet, et se développe avec l'analyse répétée de stimuli. Il est d'ailleurs difficile à supprimer une fois appris. D'autre part, il y a le *traitement contrôlé*, qui est, quant à lui, plus lent, généralement effectué en série, requiert de l'effort, et limite la capacité de la mémoire à court-terme. Ce type de traitement est manipulé par le sujet lui-même et est employé pour analyser une information nouvelle ou originale. De plus, le traitement contrôlé est facilement modifié ou supprimé. Selon Shiffrin et Schneider (1977), toutes les tâches sont des mélanges complexes de traitements contrôlés et automatiques. La combinaison de ces deux types de traitement rend parfois difficile leur distinction dans une tâche spécifique (Leplat, 1988).

Si l'on intègre les idées de Shiffrin et Schneider à celles d'Anderson, il est possible de proposer que le traitement contrôlé serait plus important dans la phase déclarative d'Anderson, et que la phase procédurale impliquerait un traitement de l'information de type automatique. Toutefois, l'aspect intéressant amené par Shiffrin et Schneider consiste en la *combinaison* des deux types de traitements dans l'habileté. Alors qu'Anderson sépare les composantes déclaratives et procédurales de l'habileté, Shiffrin et Schneider proposent que l'habileté acquise est elle-même une combinaison complexe de différents traitements. De la même manière, Squire et Frambach (1990) et Willingham, Bullemer et Nissen (1989) suggèrent que l'habileté cognitive est basée sur l'utilisation *combinée* de connaissances procédurales comme de connaissances déclaratives. Le joueur d'échecs professionnel utilise-t-il seulement des procédures automatisées? Ses connaissances déclaratives ne continuent-elles pas à contribuer à sa performance ?

D'autres modèles de l'acquisition d'habiletés cognitives.

Crossman (1959) propose un modèle simple de l'apprentissage d'habiletés. Il stipule que les sujets essaient différentes méthodes pour effectuer une tâche et sélectionnent les plus rapides. Donc, dans un ensemble de méthodes possibles, une d'entre elles sera choisie au hasard à chaque essai d'apprentissage. Ensuite, une comparaison des différentes méthodes sera faite sur un grand nombre d'essais. Si l'une était plus rapide, cela augmenterait la probabilité qu'elle soit choisie au prochain essai.

Quelque peu simpliste, ce modèle n'offre que peu d'information quant aux processus précis par lesquels les méthodes sont "évaluées" et "sélectionnées".

Cheng (1985) émet l'hypothèse que l'amélioration de la performance à une tâche peut s'expliquer par une restructuration des composantes de la tâche. Ces dernières sont coordonnées, intégrées et réorganisées en des unités perceptuelles, motrices ou cognitives nouvelles. Les anciennes composantes sont donc remplacées par des procédures plus efficaces impliquant les nouvelles composantes.

Mackay (1982) suggère quant à lui qu'un réseau précis de composantes cognitives forme une représentation de la tâche à effectuer. L'habileté se forme par le renforcement graduel des liens entre ces composantes. Kolers et Duchnicky (1985) proposent, un peu à la manière de Cheng, qu'il doit y avoir une ségrégation perceptuelle des unités de la tâche afin que l'habileté puisse être acquise.

D'autres auteurs ont proposé des modèles théoriques adaptés à des habiletés cognitives précises. Par exemple, Ericsson (1985) s'est penché sur les habiletés mnémoniques, tandis que Campbell et Graham (1985) se sont intéressés à l'habileté de la multiplication mentale. Plusieurs auteurs en psychologie cognitive se sont donc attardés à expliquer l'acquisition d'habiletés cognitives. La théorie la plus influente à ce jour demeure cependant celle d'Anderson.

Caractéristiques de l'apprentissage d'une habileté cognitive

Comme le lecteur peut le constater dans la revue de littérature présentée plus tôt, une panoplie de tâches peut être employée pour mieux comprendre l'acquisition d'une habileté cognitive. La plupart des recherches neuropsychologiques ont utilisé la Tour de Hanoï ou des versions adaptées de celle-ci afin d'étudier l'apprentissage procédural cognitif chez diverses populations avec lésions neurologiques. Le but de ces études a généralement été de déterminer la localisation du dommage cérébral qui peut, soit produire un déficit d'apprentissage d'une nouvelle habileté cognitive, soit préserver ce

type de capacité mnésique. Très peu de ces études, cependant, se sont attardées à caractériser la nature des processus cognitifs impliqués dans l'acquisition d'habiletés cognitives. En effet, la question demeure toujours à savoir si ce type d'apprentissage est soumis aux mêmes règles et caractéristiques qui gouvernent l'apprentissage d'habiletés motrices ou perceptuelles que l'on connaît beaucoup mieux, et si l'acquisition d'une habileté cognitive répond aux *critères* que l'on s'est donné par consensus de l'apprentissage procédural ou implicite. La présente section a pour but de soulever certaines questions par rapport aux habiletés cognitives et de suggérer une nouvelle tâche, la Tour de Londres, comme outil pour tenter d'y répondre.

L'apprentissage d'habiletés cognitives suit-il les principes de l'apprentissage procédural ou implicite ?

Si certains chercheurs optent pour le terme *apprentissage procédural* (dans la lignée de la taxonomie de la mémoire de Squire, 1992) et d'autres pour celui d'*apprentissage implicite* (dans la lignée de la taxonomie de Schacter, 1987, 1990, 1994), tous font référence à des études qui ont employé le même type d'épreuves d'habileté cognitive, c'est-à-dire des tâches où l'on voit une amélioration de la performance par la pratique, indépendamment du fait que les sujets ont conscience ou non de leur amélioration. En intégrant les résultats des diverses recherches qui ont utilisé de telles tâches (principalement motrices, visuomotrices, ou perceptuelles), il est possible de dégager certains principes qui gèrent ce type d'apprentissage (Cleeremans, Destrebecqz, & Boyer, 1998):

- (1) L'apprentissage peut être *indépendant de la conscience* du sujet de son niveau d'amélioration à la tâche.
- (2) L'apprentissage est *spécifique*, et donc relativement inflexible lors de transferts à d'autres tâches.
- (3) L'apprentissage est *robuste* en termes de rétention à long terme et d'interférence.

La conscience de l'apprentissage

Le critère sans doute le plus saillant pour qu'un apprentissage soit considéré comme procédural est que l'amélioration de la performance du sujet peut se faire sans qu'il ou elle ne se rende nécessairement compte de son apprentissage. L'intention d'apprendre n'est donc pas nécessaire, mais elle peut toutefois être présente. Plusieurs auteurs cherchent à s'assurer que leurs sujets ne se rendent pas compte qu'ils sont en train d'apprendre afin de pouvoir déclarer, avec plus de certitude, que l'apprentissage observé est bel et bien procédural. Par exemple, Nissen & Bullemer (1987), ont élaboré un paradigme expérimental maintenant couramment utilisé dans le domaine de l'apprentissage d'habiletés visuomotrices, où le sujet doit effectuer une série de mouvements en réponse à des stimuli visuels qui suivent, à son insu, une séquence répétée. Malgré que les sujets ne soient pas nécessairement conscients de la présence de la séquence, leur performance est significativement meilleure lorsque les stimuli sont présentés dans la séquence répétée que lorsqu'ils sont présentés de manière aléatoire. Il est donc possible, grâce à ce paradigme expérimental, d'isoler la composante implicite de l'apprentissage, en s'assurant que le sujet n'a pas assez de connaissance explicite de la séquence (par exemple, qu'il [ou elle] puisse verbaliser et décrire la séquence) qui puisse contribuer significativement à l'amélioration de la performance (Cohen, Ivry & Keele, 1990; Doyon, 1997; Hazeltine, Grafton, & Ivry, 1997; Rauch et al. 1995; Reber & Squire, 1998; Willingham et al., 1989). Dans ce genre de tâche d'apprentissage de séquences, la connaissance explicite vient "brouiller les cartes" en rendant plus difficile d'attribuer l'apprentissage à une composante réellement procédurale. Si l'on adopte cette conception (et nous discuterons plus loin de sa validité), il devient alors important de mesurer cette connaissance explicite afin de s'assurer que les résultats obtenus reflètent un apprentissage autre que permis par la mémoire déclarative. La manière optimale de mesurer la connaissance explicite dans le paradigme de la tâche de séquence répétée n'est pas encore établie (Rauch et al., 1995). Certains utilisent des tâches d'interférence afin d'empêcher toute reconnaissance de la séquence (par exemple, Hazeltine et al., 1997), d'autres encore testent la connaissance du sujet par des questionnaires, des tests de rappel

ou de reconnaissance. Par exemple, Doyon et ses collègues (Doyon et al., 1996, 1997) ont utilisé de tels outils avec une version modifiée de la tâche de séquence visuelle répétée dans des études d'imagerie cérébrale, ainsi que chez des patients atteints de la maladie de Parkinson, de lésions au cervelet, ou encore au lobe frontal. Afin de s'assurer que tous les sujets étaient demeurés incapables de reproduire ou de verbaliser la séquence sur demande, ils ont administré un bref questionnaire de connaissance déclarative de la séquence comprenant des questions comme "Avez-vous remarqué quelque chose pendant l'exécution de la tâche?", ou encore, "Avez-vous remarqué une séquence ou un patron répétitif dans la présentation des stimuli?" et "Quelle était la séquence?". De plus, Doyon et ses collaborateurs ont demandé au sujet de reproduire physiquement la séquence, sans indice, afin d'obtenir une mesure comportementale de sa connaissance explicite. D'autres auteurs ont employé des tests de reconnaissance d'une partie de la séquence. Par exemple, Rauch et ses collaborateurs (1995) présentaient une série de 12 "mini-séquences" parmi lesquelles les sujets devaient en reconnaître six correspondant à la séquence pratiquée. Ces mesures déclaratives permettent donc aux chercheurs de faire des analyses en éliminant les données provenant de sujets qui connaissent la séquence de manière explicite, afin de s'assurer que le patron de résultats observé est bel et bien associé à un apprentissage implicite et non explicite de l'habileté.

Une autre manière de s'assurer qu'une tâche est véritablement procédurale ou implicite est de mesurer le niveau d'apprentissage chez des patients amnésiques. Puisque ces derniers démontrent des déficits significatifs à encoder l'information déclarative, une amélioration de leur performance à une tâche peut être plus facilement attribuée à un apprentissage procédural ou implicite.

Ce souci de dissociation des composantes déclaratives et procédurales des tâches est donc très présent dans la littérature sur l'apprentissage d'habiletés motrices. Qu'en est-il de l'apprentissage d'une habileté cognitive? Peut-on apprendre une habileté cognitive sans s'en rendre compte? Les résultats d'études chez les patients amnésiques suggèrent qu'une habileté cognitive peut aussi être acquise indépendamment de la conscience sujet de son apprentissage, et ce, même si le sujet ne se rappelle plus des séances d'apprentissage elles-mêmes (voir section *Revue de littérature*). La Tour de

Hanoi est fréquemment employée parce que sa solution complexe n'est pas accessible consciemment au début de l'apprentissage. La performance s'améliore, même si les sujets n'ont pas encore compris de manière déclarative la stratégie à adopter. Par contre, au bout d'un certain nombre d'essais, la solution peut devenir apparente, le sujet pouvant alors la verbaliser. S'agit-il alors toujours d'apprentissage procédural ou implicite ? Le débat reste ouvert puisque peu d'auteurs ont discuté des limites de ce type d'apprentissage.

Dans ce débat, il est possible d'apporter une distinction importante entre (1) la conscience *de l'amélioration de la performance*, et (2) la conscience *des mécanismes de l'apprentissage*. Nous proposons (1) que toutes les habiletés, qu'elles soient cognitives, motrices ou perceptuelles, peuvent avoir des composantes déclaratives qui nous donnent donc une certaine conscience de notre apprentissage. Il est possible d'être conscient que notre performance est de plus en plus précise ou fluide, et il est également possible d'avoir conscience de certaines stratégies qui rendent notre performance plus efficace. Par exemple, le joueur d'échecs est capable de verbaliser ses stratégies et de les enseigner, de manière explicite, à un novice. Par contre (2), toutes les habiletés sont *procédurales*, dans ce sens qu'elles ne donnent pas un accès conscient à la foule de processus complexes qui s'effectuent de manière automatique au niveau du système cérébral pendant l'apprentissage. En effet, le joueur d'échecs n'a pas de contrôle conscient sur les *processus* qui améliorent sa performance, comme par exemple l'accès plus rapide aux informations mémorisées, l'analyse visuelle plus efficace, ou l'élaboration accélérée de stratégies. Tous ces processus qui sous-tendent l'habileté sont non-déclaratifs et sont développés et raffinés par la pratique au niveau du cerveau. Que certaines informations par rapport à la tâche ou aux stratégies à employer pour l'effectuer soient explicites ne font pas de cette tâche une épreuve de mémoire déclarative. L'habileté peut requérir la mémoire déclarative, mais ce sont les composantes procédurales qui permettent le développement de l'habileté.

Dans le but de pouvoir comparer les résultats des études présentées dans le cadre de ce mémoire avec la littérature, nous avons tenté de rester fidèle à la dissociation explicite/implicite ou non-déclarative/déclarative. Cependant à la lumière du débat que

nous avons soulevé précédemment, nous proposons que cette dissociation des composantes explicites et implicites n'est peut-être pas aussi cruciale que l'on ne le croit, en particulier dans le cas des habiletés cognitives. En effet, la plupart des habiletés que nous acquérons dans la vie de tous les jours sont des mélanges complexes de connaissances procédurales et déclaratives. Il est donc raisonnable de croire que les deux systèmes qui supportent ces différents types de connaissances sont en constante interaction dans le processus de formation d'une habileté cognitive. Si l'on adopte ce point de vue, il devient alors important de considérer les composantes déclaratives et procédurales comme faisant partie, ensemble, du processus d'apprentissage d'une habileté cognitive, ce qui peut influencer notre interprétation de résultats, comme par exemple ceux obtenus auprès de patients amnésiques. En effet, si l'on considère que les habiletés cognitives sont caractérisées par une plus grande contribution de la mémoire déclarative par rapport aux habiletés motrices, par exemple, il peut paraître paradoxal que des patients amnésiques puissent apprendre normalement de telles habiletés. Selon le modèle d'Anderson, la connaissance déclarative joue un rôle important au début du processus d'acquisition de l'habileté. Ainsi, il serait raisonnable de s'attendre à ce que les patients amnésiques soient plus lents en début d'apprentissage, puisque ce dernier se construit presque uniquement grâce aux processus non-déclaratifs ou procéduraux. Les études revues précédemment suggèrent qu'effectivement, les patients amnésiques sont capables d'acquérir de nouvelles habiletés cognitives, quoique plusieurs d'entre elles notent que leurs patients n'ont pas une performance équivalente à la normale. Cette observation appuie donc l'idée que les habiletés cognitives font appel à des processus déclaratifs comme procéduraux.

La spécificité de l'apprentissage

Un deuxième "critère" de l'apprentissage procédural ou implicite est sa *spécificité* (Schacter, 1985; Glisky, et al., 1986). En ce qui concerne les habiletés motrices ou perceptuelles, il semble que cet apprentissage est très fortement relié aux caractéristiques "physiques" de la tâche elle-même, plutôt qu'aux stratégies et procédures qui lui sont sous-jacentes. Par exemple, dans une étude utilisant à nouveau la tâche visuomotrice de

séquence répétée, Willingham et ses collaborateurs ont entraîné des sujets à une séquence répétée de dix éléments composée de quatre stimuli de différentes couleurs (Willingham et al., 1989). Par la suite, ils ont étudié le transfert de l'apprentissage implicite de la séquence à une tâche où les stimuli et la séquence présentée étaient complètement identiques, excepté que les stimuli étaient blancs au lieu d'être de couleurs différentes. Les résultats ont démontré que les sujets ayant été entraînés à la séquence n'étaient pas significativement plus efficaces à la tâche de transfert. Les auteurs proposent que l'apprentissage est intimement relié aux caractéristiques perceptuelles et motrices des comportements sollicités par la tâche pratiquée. Ainsi, si l'une de ces caractéristiques est altérée, l'avantage acquis par la pratique antérieure d'une séquence n'est plus applicable.

Plusieurs données nous permettent de croire que les habiletés cognitives sont spécifiques et difficilement transférables. Par exemple, une étude a démontré que des enfants brésiliens qui vendaient des objets dans la rue avaient atteint un haut niveau d'efficacité à calculer le prix pour des commandes de plusieurs objets différents. Par contre, lorsqu'ils étaient amenés dans le laboratoire, ces mêmes enfants avaient de la difficulté à effectuer des calculs de même niveau de difficulté, mais sans référence au contexte de la vente (Carragher, Carragher, & Schlieman, 1985). Les données de Brooks et Baddeley (1976) avec des patients amnésiques ayant pratiqué un casse-tête concordent aussi avec ce critère de spécificité de transfert de l'apprentissage. En effet, la pratique d'un même casse-tête n'aidait pas les sujets à mieux effectuer un nouveau casse-tête comportant les mêmes règles et procédures et le même type de stimuli (mais différents dans leur apparence physique), suggérant que l'habileté développée était très spécifique aux procédures reliées à un seul casse-tête et ne pouvait donc pas se généraliser à d'autres épreuves similaires.

Les résultats de Brooks et Baddeley (1976) indiquent qu'un entraînement à un seul item favorise le développement d'une habileté très spécifique à cet item. Toutefois, d'autres données suggèrent qu'il est possible, à l'intérieur d'un même type tâche où les stimuli, les procédures, et les stratégies demeurent semblables à chaque essai, d'acquérir des habiletés cognitives plus générales. Par exemple, Cohen et ses collègues (1985) ont démontré que des amnésiques et des sujets sains étaient capables de résoudre de manière

efficace la Tour de Hanoï à différents stades de départ, c'est-à-dire à des stades plus ou moins avancés dans la solution du problème. De plus, si l'on présentait le problème de la Tour de Hanoï, mais cette fois en ayant pour but de placer les disques sur la tige du milieu (plutôt que sur celle de droite comme dans la version originale), les sujets apprenaient à résoudre la tâche de façon optimale à l'intérieur d'une seule session d'apprentissage, et ce, malgré que la séquence de mouvements de disques à effectuer était très différente de celle qui était nécessaire pour placer les disques sur la tige de droite. Ces données suggèrent donc que les sujets acquièrent de l'information par rapport à la *structure profonde* du problème et sont donc capables d'appliquer les stratégies à la tâche, même lorsque les configurations de départ ou finales sont différentes. Il est donc possible de dégager ici deux composantes de l'apprentissage d'une habileté cognitive, l'une *spécifique*, comme lorsque les sujets pratiquent à répétition la Tour de Hanoï dans sa version originale, et l'autre *générale*, qui permet par exemple de pouvoir résoudre efficacement la Tour de Hanoï à partir de différentes configurations de départ ou dans le but de compléter le problème avec une configuration d'arrivée différente.

En résumé, à la lumière de ces données, quoique limitées, sur la spécificité de l'apprentissage d'habiletés cognitives, il semble que celles-ci peuvent, comme les habiletés motrices, être très spécifiques à une seule tâche. Par contre, certaines données suggèrent que l'entraînement dans différentes conditions à un type de tâche peut favoriser le développement d'habiletés plus générales qui permettent au sujet d'être plus flexible. Dans le cadre des études présentées dans ce mémoire, nous discuterons de l'utilité d'apprentissages généraux ou spécifiques.

La robustesse de l'apprentissage

Si chaque hiver, nous n'avons pas à réapprendre à skier, c'est que les systèmes neuronaux qui supportent l'apprentissage d'habiletés motrices, visuomotrices, ou perceptuelles ont encodé l'information nécessaire à la performance et la rendent accessible sans monopoliser à nouveau toutes nos ressources mentales. Qu'en est-il des habiletés cognitives? Peu d'études se sont intéressées à la rétention à long terme de ce

type d'habileté. En neuropsychologie, elles sont inexistantes. De façon intuitive, on pourrait croire que les habiletés cognitives suivent les mêmes principes que les habiletés motrices ou perceptuelles. Mais pourquoi est-il difficile de se remettre à une langue que l'on n'a pas employée depuis des années, ou d'aider un enfant à faire des mathématiques que l'on n'a pas vues depuis l'école primaire? Nous proposons que ces difficultés sont dues à l'apport plus important de la mémoire déclarative dans l'acquisition d'habiletés cognitives que dans un apprentissage moteur ou perceptuel. Ceci rejoint donc le principe de *conscience* abordé plus tôt et suggère que l'acquisition d'une habileté cognitive implique peut-être la mémoire déclarative ou explicite de manière plus importante. La récupération des connaissances déclaratives nécessaires à la tâche, par exemple les règles de grammaire ou les théorèmes mathématiques, pourrait se faire en parallèle au retour à l'accessibilité des procédures établies auparavant, qui permettent de revenir rapidement à un bon niveau de performance. Ce phénomène pourrait expliquer pourquoi nous remarquons souvent qu'une habileté "oubliée" est vite retrouvée lors de l'exécution de la tâche.

Les études dans ce mémoire n'incluent pas de mesure de la rétention à long terme de l'habileté acquise. Par contre, cette voie est certainement à explorer dans des expérimentations subséquentes où les mêmes sujets pourraient être retestés dans douze mois, par exemple.

La Tour de Londres

Afin de pouvoir caractériser plus précisément l'acquisition d'une habileté cognitive, il était important de trouver une tâche qui puisse se comparer à celles qu'on a documenté dans la littérature, mais qui, en même temps, donnerait le loisir d'examiner plusieurs composantes différentes de l'habileté. Les tâches déjà existantes dans la littérature sur l'apprentissage d'habiletés cognitives offrent la possibilité d'observer un apprentissage procédural par la pratique, mais nous limitent dans le nombre et la nature des processus à étudier. Par exemple, un des désavantages de la Tour de Hanoï dans l'étude de la mémoire procédurale cognitive est que l'habileté est reliée à un même

problème présenté à plusieurs reprises. L'habileté est donc très spécifique. De plus, les tâches nécessitant des calculs complexes ou la manipulation de matériel informatique sont parfois mal adaptées pour examiner l'apprentissage chez des sujets plus âgés ou porteurs de lésions cérébrales.

Dans le but de mieux comprendre les mécanismes de l'apprentissage d'une habileté cognitive, il nous est apparu pertinent de choisir une version informatisée de la Tour de Londres initialement développée par Shallice (1982) et adaptée par Owen et ses collègues (Owen, et al., 1992; Owen, Downes, Sahakian, Polkey, & Robbins, 1990; Owen, Doyon, Petrides, & Evans, 1996). La Tour de Londres ressemble à la Tour de Hanoï de façon conceptuelle. Dans sa révision des tests conçus pour évaluer les fonctions exécutives, Lezak (1995) place ces tâches, ainsi que la Tour de Toronto, sous la rubrique de "Tower tests". Selon elle, ces épreuves font toutes appel à un raisonnement de type "*forward*", dans lequel des stimuli doivent être agencés à partir d'une configuration initiale pour construire un modèle ou atteindre une configuration finale spécifique. Dans la Tour de Londres, il s'agit, sur une configuration de travail, de reproduire une configuration modèle en déplaçant trois boules de couleur sur trois tiges de grandeurs différentes, et ce en suivant des règles précises: ne déplacer qu'une seule boule à la fois, ne jamais déplacer une boule reposant en-dessous d'une autre, et tenter de reproduire le modèle dans un nombre de déplacements minimal. Maintenant utilisée à profusion en milieu clinique et scientifique pour étudier les processus sous-jacents aux fonctions exécutives, la Tour de Londres fait appel à une multitude d'opérations et de processus cognitifs tels la mémoire de travail, l'attention soutenue, la capacité de générer, d'évaluer, et de corriger des stratégies, la recherche active d'alternatives, ou encore l'analyse visuospatiale (Owen & Doyon, sous presse; Owen et al., 1990, 1992, 1996; Shallice, 1982; Vanier, 1991). Si l'on reprend la définition proposée plus tôt, l'habileté à résoudre les problèmes de la Tour de Londres peut donc correspondre à la capacité acquise par la pratique, d'utiliser efficacement tous ces processus cognitifs en combinaison afin d'exécuter la tâche.

D'abord conçue de manière à proposer une série de quelques problèmes de difficulté croissante, la Tour de Londres offre néanmoins plus de 200 possibilités

d'agencement des stimuli. Ainsi, il est possible de générer, à partir du matériel de base de cette tâche, différents problèmes à des niveaux de difficulté variés. Cette versatilité de la Tour de Londres lui confère un potentiel très intéressant pour étudier la pratique d'une tâche cognitive.

Problématique de la Recherche

Les données disponibles à ce jour sur l'apprentissage d'habiletés cognitives en neuropsychologie demeurent limitées. Des études auprès de patients porteurs de lésions cérébrales spécifiques suggèrent que l'acquisition d'habiletés de nature cognitive serait supportée par des systèmes neuronaux semblables à ceux qui sous-tendent l'apprentissage d'habiletés visuomotrices ou perceptuelles. Par contre ces études ne nous renseignent que très peu sur les caractéristiques et composantes de l'apprentissage d'habiletés cognitives. Ainsi, dans le cadre de ce mémoire, nous avons tenté de développer des paradigmes expérimentaux qui nous permettraient d'observer et de manipuler l'apprentissage d'une habileté cognitive, dans le but d'élargir notre connaissance des mécanismes qui sous-tendent l'acquisition de telles habiletés.

Deux études ont été effectuées à l'aide d'une version informatisée de la Tour de Londres auprès de jeunes sujets sains. Trois questions nous intéressaient. D'abord, nous cherchions à valider la Tour de Londres comme tâche d'apprentissage d'habileté cognitive en mesurant l'amélioration de la performance des sujets à cette épreuve. Cette amélioration refléterait par conséquent la capacité des sujets d'acquérir de l'information quant aux règles, procédures, et stratégies nécessaires à la résolution des problèmes de la Tour de Londres. Deuxièmement, nous avons tenté de mieux comprendre les processus sous-jacents à l'acquisition de l'habileté en observant trois variables: le temps total pris pour compléter les problèmes de la Tour de Londres, le temps nécessaire pour initier la tâche, nous donnant un indice du temps de planification ou de réflexion, ainsi que le nombre d'étapes nécessaires pour effectuer les différents problèmes présentés. Les hypothèses spécifiques concernant ces variables étaient: (1) que l'acquisition de l'habileté serait caractérisée par une réduction dans le temps total nécessaire pour résoudre les problèmes de la Tour de Londres, (2) qu'avec la pratique, les sujets prendraient de moins en moins de temps pour réfléchir et planifier la solution avant de passer à l'action, et (3) qu'avec la pratique, les sujets deviendraient de plus en plus efficaces à mettre en place

leurs plans en utilisant de moins en moins d'étapes superflues ou incorrectes. La troisième question posée dans ces études était celle de la spécificité de l'apprentissage. À l'aide de deux paradigmes différents, nous avons voulu dissocier un apprentissage spécifique à la Tour de Londres, d'un apprentissage général à cette même tâche. Il était prévu que l'amélioration de la performance des sujets serait accentuée par l'insertion de stimuli répétés à leur insu, démontrant ainsi qu'un apprentissage spécifique et implicite peut avoir lieu en plus d'un apprentissage procédural général d'une habileté cognitive.

CHAPITRE II

ARTICLE:

*Cognitive skill learning examined using a new
version of the Tower of London Test*

**Cognitive Skill Learning examined using a new
version of the Tower of London Test**

Marie-Christine Ouellet and Julien Doyon

**École de psychologie
Université Laval, Québec**

**Institut de réadaptation en déficience physique de Québec,
Site François-Charon, Québec**

Running Head: Skill learning, Tower of London test

**Correspondance to: Marie-Christine Ouellet
Groupe de Recherche en Réadaptation Physique
IRD PQ, Site François-Charon Local B-77
525 Boul. Wilfrid-Hamel Est
Québec, Québec
Canada, G1M 2S8
Fax: (418) 529-3548
E-mail: mcouellet@darwin.psy.ulaval.ca**

Author's note

This manuscript is based on work that served as fulfillment of the requirements for a master's degree to Marie-Christine Ouellet at Université Laval. Experiments were supported by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada through grant OGPIN-012 to Julien Doyon, and by a FRSQ-FCARsanté scholarship to Marie-Christine Ouellet.

Abstract

A computerized version of the Tower of London (TOL) task was used to investigate the cognitive processes involved in the acquisition of a new problem-solving skill in healthy volunteer subjects. The results of two studies subjects using two different experimental paradigms are described. The first objective of these studies was to determine whether the TOL can be used as a cognitive skill learning task. The results show that subjects' performance increased significantly within a single training session, thus indicating that they acquired the necessary skill to resolve the problems of the TOL task. The second objective was to describe some of the underlying mechanisms allowing the development of this type of ability. Our findings suggest that skill acquisition at the TOL is associated with an acceleration of the planning or thinking phase and of the intermediate processes that allow on-going monitoring of strategies and actions, such as working memory, as well as an increase in efficiency at executing plans. Finally, a third objective of these experiments was to study subjects' ability to learn a cognitive sequence related to repeating problems of the TOL. The results reveal that a specific skill pertaining to the rules, procedures, and strategies of the repeating problems, can develop over and above a more general skill at solving cognitive problems.

Introduction

Cognitive skill learning refers to the process by which rules, procedures and strategies relevant to the performance of a task demanding mental operations, come to be combined and used effectively following repeated practice. The acquisition of such skills is an essential feature of human development as they are central to nearly all of our activities. For example, these include abilities like speaking a language, adding numbers, using a telephone, as well as more complex skills in highly specific domains such as computer programming and chess playing. Results of psychological investigations suggest that specialized abilities are acquired in the same manner as the simpler ones that are learned over time in our everyday life (Anderson, 1990), thus justifying the use of skill learning tasks in the laboratory as a window to enlighten our understanding of the mechanisms that govern the development of new cognitive skills.

A wide variety of paradigms have been used to study the time course and the critical parameters required to trigger the learning of new cognitive abilities. Domains in which such skills have been examined include the learning of language (Kolers & Duchnicky, 1985), mnemonic abilities (Ericsson, 1985), artificial grammar (see Knowlton & Squire, 1994 for a review), puzzle solving (Brooks & Baddeley, 1976; Ronacci, Troisi, Carlesimo, Nocentini, & Caltagirone, 1996), rules and probabilities (Best, 1990; Carlson, Sullivan, & Schneider, 1989; Knowlton, Mangels, & Squire, 1996; Knowlton, Squire, & Gluck, 1994; Kyllonen & Stephens, 1990), mathematics and arithmetics (Campbell & Graham, 1985; Charness, Milberg, & Alexander, 1988; McGlinchey-Berroth, Milberg, & Charness, 1989; Pauli et al. 1994), control of complex simulated economy systems (Broadbent & Aston, 1978; Broadbent, Fitzgerald, & Broadbent, 1986), computer use and programming (Anderson, Farrell, & Sauers, 1984; Glisky, Schacter, & Tulving, 1986; Glisky & Schacter, 1988, 1989; Pirolli & Anderson, 1985; Squire & Frambach, 1990), as well as planning and problem-solving (Butters, Wolfe, Martone, Granholm, & Cermak, 1985; Daum et al., 1995; Fasotti, Eling, & van Houtem, 1994; Saint-Cyr, Taylor, & Lang, 1988). Overall, the results of these studies indicate that normal control subjects become more efficient at executing cognitive tasks, as evidenced by a significant experience-

related increase in knowledge and performance with practice. Furthermore, several of these experiments indicate that amnesic patients exhibit a similar pattern of learning to that of normal control subjects, thereby supporting the idea that this type of learning is truly procedural.

Theories of skill learning provide a useful conceptual framework to understand the processes involved in the acquisition of cognitive skills. For example, the models elaborated by Fitts (1964) and Anderson (1982, 1983, 1987) propose the existence of three distinct stages in the development of a cognitive skill. These authors suggest that in the first stage, skills develop through the use and integration of declarative knowledge in the form of instructions and essential information pertaining to the performance of the task at hand. Anderson (1990) argues that, at this stage, learners are using domain-general problem-solving procedures that are provided by more and more examples of possible solutions or mental operations, which can then be stored as declarative knowledge for future use. It is believed that this knowledge can speed up performance because, rather than having to go through the whole process involving the application of rules and procedures of a given task, a particular strategy can be retrieved directly from memory (Anderson & Fincham, 1994; Anderson, Fincham, & Douglass, 1997; Pirolli & Anderson, 1985). Thus, in this first stage, changes are observed in the amount of declarative information that learners acquire with the development of a new skill, the knowledge base becoming greater and better organized with experience. Evidence for such changes comes from studies that have looked at differences between experts and novices in different cognitive domains such as chess playing (DeGroot, 1965) or physics (Heller & Reif, 1984; Larkin, 1985). The results indicate that expert chess players, for example, can rely on more knowledge acquired from previously encountered game configurations, and consequently, show a more efficient performance than beginners.

The second stage of cognitive skill learning is an associative phase where knowledge is converted, through different processes, into procedures specific to the domain and is applied more directly to the execution of a skill. Anderson (1982) describes several learning mechanisms (*for example*, composition and proceduralisation) by which procedures are then combined to generate more efficient strategies to perform a

cognitive task. Others researchers have proposed that, in this phase, components of the task are restructured into more complex units, thereby allowing a further speed-up in performance (Cheng, 1985; Rosenbloom & Newell, 1987). Empirical evidence supporting the existence of a reorganization of components of a skill during the acquisition process comes, for example, from studies which have shown that normal control subjects become more efficient with practice at putting together the different steps of an algorithm in mental calculation (Charness et al., 1988; Charness & Campbell, 1988) as well as at completing exercises that require reasoning to solve geometry problems (Anderson, Greeno, Kline, & Neves, 1981).

Finally, in the third stage, called the autonomous phase, skills are thought to be refined and to become more automated. Mechanisms like tuning (Anderson, 1982, 1990) and automatization (Shiffrin & Dumais, 1981; Logan 1985, 1988) have been proposed to describe the processes that occur at this stage of learning. Studies using dual-task paradigms have provided insight into this phase of skill acquisition. They suggest that the automatization of cognitive skills is characterized by a reduction of the demands placed on cognitive resources and, in particular, on attentional and working memory capacities (Carlson et al., 1989; Heuer, 1996; Woltz, 1988; Yap & van der Leij, 1994).

One category of cognitive skills that has received much attention from the scientific community relates to the ability to solve complex problems. The main reason for emphasizing the study of this type of skill pertains to the fact that nearly all human cognitive activities contain some aspects of problem-solving (Anderson, 1983, 1990). To study the cognitive characteristics involved in learning new problem-solving skills, some researchers have relied on the Tower of Hanoi puzzle (Anzai & Simon, 1979). In this task, subjects need to develop and carry out a plan to displace a stack of disks on three pegs from a starting-position to a goal-position, by moving only one disk at a time and never placing a larger disk over a smaller one. Performance on this task is usually measured by recording the total number of displacements used by the subject to achieve the goal position. Early indications that the Tower of Hanoi could be used as a cognitive skill learning task, was provided by Cohen and his collaborators (Cohen & Corkin, 1981; Cohen, Eichenbaum, Deacedo, & Corkin, 1985) who described that the amnesic patient

H.M. was able to learn this task as fast as control subjects and to remember how to solve the puzzle despite having any recollection of ever having seen the test. Several subsequent studies showed that normal control subjects exhibit procedural learning on this task, as evidenced by a significant decrease in the number of superfluous moves used to find the optimal solution when they are repeatedly exposed to the puzzle (Beatty et al., 1987; Butters et al., 1985; Cohen et al., 1985; Saint-Cyr et al., 1988). One disadvantage of using the Tower of Hanoi task to study skill learning is, however, that on every practice trial, the subject is presented with the exact same problem. This makes the learning very specific to one particular solution, thereby limiting the ecological validity of this task. Indeed, the physicist who has acquired a cognitive skill at resolving complex problems is not faced with the same problem repetitively. In contrast, the latter must deal with problems different from one another, yet requiring the same kind of cognitive operations. Furthermore, repeated practice at the Tower of Hanoi implies searching for a recursive strategy, which can eventually lead to explicit knowledge of this particular strategy. Thus, the question that arises is whether procedural learning can still occur when subjects have acquired declarative knowledge of the solution to the puzzle.

In the present studies, we wished to employ a problem-solving task that would allow comparisons with findings from studies that used the Tower of Hanoi puzzle, while taking into consideration the limitations mentioned above. To do so, we used a computerized version of the Tower of London (TOL) task (initially developed by Shallice [1982] and adapted by Owen and his collaborators [1990, 1992, 1996]) to study the course as well as the specificity of the cognitive procedures necessary to resolve different problems requiring both planning and working memory capacities. The TOL task consists of a series of visual problems in which subjects are asked to move colored balls on a working display in order to reproduce a goal configuration displayed on a model. In this new version of the task, the subjects were required to follow certain rules that restricted the type of moves they could make to achieve the desired solution. They were also asked to be as efficient as possible, both in terms of time and number of moves needed to complete each problem. Different combinations of working and model displays were created in order to produce a wide range of problems of different difficulty levels.

Previous work has demonstrated that the TOL requires a complex coordination of several cognitive operations such as working memory, planning, the elaboration, evaluation, monitoring, and editing of strategies, the generation of responses, an active search of possible solutions and alternatives, the analysis of visuospatial information, and sustained attention (Owen, 1997; Owen & Doyon, in press; Owen et al., 1990, 1992, 1996; Shallice, 1982; Vanier, 1991). Because most real-life cognitive skills consist of a complex amalgam of different cognitive processes used in conjunction, the TOL task was used as a tool to study the cognitive processes mediating the acquisition of a cognitive skill.

In this paper, we describe the results of two studies using two different experimental paradigms to measure the subjects' ability to acquire a new problem-solving skill. These studies had three goals. The first objective was to determine the course and the learning characteristics associated with practice on the TOL test, in order to determine the validity of this task as an instrument to measure cognitive skill acquisition. We hypothesized that general skill learning would occur with repetitive presentation of the TOL problems. The second objective was to describe the nature of the cognitive processes that allow subjects to develop a skill at resolving the TOL problems, by looking at different dependent measures of performance over time. We predicted that, with practice, subjects would become more efficient at thinking about or planning a solution to the problems, and would also carry out more effectively these solutions by showing a reduction in the number of superfluous or inefficient moves. Finally, the third objective was to study the subjects' ability to learn a sequence of TOL problems, in order to differentiate the general from the specific aspects of skill learning through the presentation of repeating and non-repeating problems. It was hypothesized that efficiency at this skill would be amplified when a repeating sequence of problems was presented, independently of the subjects' declarative knowledge of the solution to these problems.

Experiment 1

There is now a general agreement that the ability to acquire a sequence of events or actions is an essential part of skill learning (Clegg, DiGirolamo, & Keele, 1998). For example, the serial reaction time task has been repeatedly used to measure one's capacity to acquire a sequence of movements (e.g. Doyon, 1997; Nissen & Bullemer, 1987). Sequence learning paradigms are useful in that they are relatively simple to implement and allow easy manipulation of the stimuli. In such a design, changes in improvement seen over time can therefore readily be associated with the presence or absence of the sequence. The acquisition of sequential information can occur in a variety of tasks and can involve both nondeclarative processes, where subjects are unaware of the presence of the sequence or are unable to describe it explicitly, and declarative processes, where subjects are aware of the existence of a repeating sequence (Grafton, Hazeltine, & Ivry, 1995).

In Experiment 1, we used a sequence learning paradigm and adapted it to the TOL task to obtain a measure of the subjects' capacity to learn a new cognitive skill. We wished to answer two different questions. The first was whether, with practice, one can acquire the skill necessary to solve the TOL problems by improving one's performance across blocks of trials. The second was to determine whether the inclusion of an embedded repeating sequence of problems of the TOL task had an effect on performance that was similar to the one observed in previous studies of visuomotor sequence learning (Nissen & Bullemer, 1987). We hypothesized that performance would improve with practice on the task, regardless of the presence or absence of a repeating sequence. However, we also predicted that subjects presented with a repeating sequence of problems would demonstrate a greater improvement in performance on the repeating trials than on the non-repeating trials.

Method

Subjects

Thirty-six healthy volunteers (20 female, 16 male) participated in the study. The majority of these subjects were undergraduate students at Laval University recruited via advertisement on bulletin boards and lists of volunteers from previous experiments in our laboratory. Subjects with any prior or present psychiatric or neurological disorder were excluded from the study. They were aged between 18 and 42 years (MEAN=24.42 years, SD=4.66) and had between 11 and 16 years of education (MEAN=14.89 years, SD=1.63). Thirty-four subjects were right-handed and two were left-handed (5.5%). All had a visual memory span within normal limits (MEAN=15.00, SD=2.18) as measured by the Wechsler Memory Scale-Revised Test (Wechsler, 1987). Also, all subjects had normal or corrected-to-normal vision and reported having normal color perception and discrimination. Subjects gave their informed written consent before participating in this study. This experiment was approved by the Ethics Committee of the School of Psychology at Laval University.

Material

Cognitive skill learning was measured using a computerized version of the Tower of London test (TOL) (Shallice, 1982; Owen et al., 1990, 1992, 1996). This task was programmed in VISUAL BASIC and was administered with a Pentium IBM compatible Compaq 1210 Presario computer equipped with a MicroTouch Touchscreen mounted on an IBM screen. Subjects were seated directly in front of the screen and asked to lay down their elbow on a foam pad on a table. The distance and height of the touchscreen were adjusted to reduce the physical demands of the task to a minimum, and to allow the most comfortable position possible throughout the testing session. The distance between the subject and the screen was therefore about 50 cm. All subjects used their dominant hand to respond to the stimuli and make movements to solve the cognitive task (see Figure 1).

Insert Figure 1 about here

Stimuli

In this version of the TOL task, subjects were presented with two displays of colored balls (each three centimeters in diameter). The set on top of the screen corresponded to a model display, while the set at the bottom corresponded to a working display. Each set was composed of three colored balls (blue, red, and green) that could be placed in any of three sockets, which could contain either one, two, or three balls. Also, each set included three black circles representing empty spaces available to locate the different balls. On each trial, both the model display and the working display were presented, and the subjects were told that the goal of the task was to rearrange, in a minimum number of moves, the colored balls in the working display, as to reproduce the exact configuration of the balls shown in the model display. To move a ball, subjects had to touch it on the screen with the index of the dominant hand, and then touch one of the vacant positions. Once touched, the ball began to flash to indicate that it had been activated and that it was ready to be moved to another location.

Subjects were asked to adhere to the following rules when moving the balls. First, they were not allowed to move a ball if another one was placed directly above it in any of the sockets. Second, a ball could not be placed in a space where there was a vacant position underneath. Therefore, the balls either had to sit in the lowest position in the socket, or had to rest on another ball. These rules ensured that on each trial, subjects had to use specific strategies to reproduce the arrangement of the balls displayed in the model, such as having to displace a ball to a temporary location in order to be able to free the movement of another ball. When subjects did not conform to these rules, the program was set such that it would not allow the moves to be completed and would produce a sound indicating that a rule had been broken.

The positions of the colored balls in both the model and working displays were predetermined as to create problems of different complexity. Problems could be solved in a minimum of either 4, 5 or 6 moves (see Figure 2). Before each problem, the experimenter indicated verbally the minimal number of moves needed to solve the problem.

Insert Figure 2 about here

Procedure

The subjects were trained on the TOL task within a single session which lasted approximately 90 minutes. The subjects were introduced to the TOL by giving them the standard instructions and rules to complete the task, followed by a brief demonstration using simple problems. They were asked to execute a series of six trials of increasing difficulty levels (1, 2, 3, 4, 5, and 6 move-problems) to insure that the rules and instructions were well understood (familiarization phase), hence allowing only minimal practice before training trials began. None of the problems completed in the familiarization phase were presented again in the learning phase.

All subjects completed five blocks of 15 learning trials. Each trial was composed of problems that required either 4, 5, or 6 moves to be solved. A 4-move problem was always followed by a 6-move problem, which was then followed by a 5-move problem. Therefore, subjects completed a total of 75 problems, 25 at each level of complexity. Subjects were specifically instructed to try to plan the solution mentally before they started displacing any balls in order to complete the problem in the minimum number of moves.

Table 1 summarizes the experimental design used in this study. Subjects were randomly assigned to one of two conditions, either a RANDOM condition (RDM), or a SEQUENCE condition (SEQ). In the RDM condition, subjects were presented with problems that were always different in the five blocks of trials. These were chosen to be

as different from one another as possible in terms of the steps involved in their optimal resolution, and thus none of the problems required the same solution. Like in the RDM condition, subjects in the SEQ condition were also presented with two blocks of trials comprising different problems, once at the beginning (Block 1), and once at the end (Block 5) of the training session. However, in Blocks 2, 3, and 4 of the training session, these subjects were exposed to a repeating sequence of three problems (one 4-move, one 6 -move, and one 5-move). In total, subjects in the SEQ group were therefore exposed 15 times to the sequence of three problems. Consecutive presentations of the sequence of problems always involved a different combination of colors, which means that although the problems looked different in terms of color configuration from one trial to another, they required exactly the same moves to be solved.

Insert Table 1 about here

The subjects in both the RDM and SEQ conditions were given the same instructions, and there was no mention of a repeating sequence in the latter condition. At the end of training, the subjects were asked to give details about the kind of strategies they used to solve the TOL task. In addition, those exposed to the repeating sequence were asked to answer a short questionnaire to assess their declarative knowledge of the repeating problems. This questionnaire comprised the following questions: (1) Did you notice anything in particular during the execution of the TOL task ? (2) Do you think that all of the problems were different from one another ? (3) Do you think that some of the problems were repeated ? (4) Did you notice a sequence of problems that repeated over and over? and (5) Did you notice anything different between the last block of trials and the other blocks of practice trials? When subjects noticed that a sequence of problems was repeated, they were then asked to give more details about it (i.e., the minimum number of moves, the starting configuration of the balls in the working or the model display, and the specific moves that had to be executed).

Performance Indices and Data Analyses

Three learning indices were used to measure the subjects' performance on the TOL problems: (1) the total time in seconds used to complete a problem, (2) the initial time in seconds before the first move was executed, providing an estimate of planning or thinking time, and (3) the number of moves used to complete the problems. Time indices were calculated by the program using the computer's internal clock and gave measures precise to the millisecond. The behavioral data were examined using separate 2 X 5 (Condition X Block) two-way analyses of variance (ANOVAs) with each dependent measure, in which Condition was treated as a between-group factor, while Block was treated as a within-subject factor. These analyses were performed in order to determine whether performance on problems increased as a function of training in both groups of subjects, and to compare the performance of subjects that were exposed to the repeating sequence of problems (SEQ condition) versus that of the subjects that were given different problems on every trial (RDM condition). The degrees of freedom in the ANOVAs were corrected using the Greenhouse-Geisser procedure for possible heterogeneity of covariance. *Post hoc* pairwise comparisons were conducted using the Tukey test (Bordens & Abbott, 1996; Howell, 1987; Kirk, 1982). An alpha level of 0.05 was used to determine the statistical significance of the results.

In addition, planned comparisons were used to provide a more detailed examination of the pattern of results. Planned orthogonal contrasts, corrected with the Bonferroni procedure for multiple comparisons, were carried out on each dependent variable to verify the following *a priori* hypotheses:

(a) the subjects in both conditions would show significant improvement in performance on the task with practice from Block 1 to Block 5.

(b) the subjects' performance would improve significantly from Block 2 to Block 4 in the SEQ condition but not in the RDM condition.

(c) the subjects' performance would deteriorate significantly when the sequence was removed (i.e. from Block 4 to Block 5) in the SEQ condition, but not in the RDM condition.

Results

The subject characteristics are summarized in Table 2. The subjects in both the RDM and SEQ conditions were well matched with respect to their age, level of education, and performance on the Visual Memory Span subtest of the Wechsler Memory Scale-Revised, as separate t-tests did not reveal any significant difference between the two groups of subjects. Also, the gender distribution was identical for both groups.

 Insert Table 2 about here

The results of Experiment 1 are presented separately for each dependent measure (total time, initial time, and number of moves) in Figures 3, 4, and 5. The results of the planned comparisons are summarized in Table 3.

Cognitive Skill Learning

Total time

A two-way ANOVA with repeated measures (Condition X Block) performed on the total time to complete the TOL problems over the five blocks of trials yielded a significant main effect of Block ($F(3, 92) = 18.50, p < 0.01$) and a significant Condition X Block interaction ($F(3, 92) = 3.67, p < 0.05$), while the effect of Condition was not significant ($F(1, 23) = 1.31, p > 0.05$). *Post hoc* comparisons using the Tukey test were performed to decompose the significant Condition X Block interaction. The results indicate that subjects in the RDM condition improved significantly from Block 1 to Blocks 2, 3, 4, and 5 ($p < 0.05$), and that subjects in the SEQ condition improved significantly from Block 1 to Blocks 4 and 5 ($p < 0.05$) as well as from Block 2 to Block 4 ($p < 0.01$), indicating that significant learning occurred with practice across blocks of trials in both groups. Comparisons across groups reveal that the subjects' performance in

both Block 1 and Block 5 of the experimental conditions did not differ ($p > 0.05$). However, subjects in the SEQ condition took significantly less time to complete the TOL problems on Block 4 than subjects in the RDM condition ($p < 0.01$), hence suggesting that additional learning of the repeating sequence had occurred in this condition.

Planned comparisons with Bonferonni corrections were used to test the *a priori* hypotheses that (a) all subjects would need significantly less time to complete the problems with practice from Block 1 to Block 5, (b) subjects exposed to the sequence, but not those solving different problems, would need significantly less time to complete the problems from Block 2 to Block 4 and (c) that the subjects trained with the sequence, but not those trained with different problems, would need significantly more time to resolve the problems from Block 4 to Block 5. As predicted, the analyses reveal that subjects in both the RDM ($F(1, 17) = 27.20, p < 0.01$) and SEQ ($F(1, 17) = 10.82, p < 0.01$) conditions took significantly less time to complete the problems from Block 1 to Block 5. Furthermore, subjects in the SEQ ($F(1, 17) = 22.72, p < 0.01$) but not in the RDM condition ($F(1,17) = 0.15, p > 0.05$) needed significantly less time to complete the problems from Block 2 to Block 4. Finally, the subjects in the SEQ condition took significantly more time to complete the problems in Block 5 than in Block 4, ($F(1, 17) = 7.09, p < 0.05$), indicating that their performance deteriorated when the sequence was removed.

 Insert Figure 3 about here

Initial time

A similar two-way ANOVA with repeated measures (Condition X Block) was performed over the five blocks of trials on the measure of initial time before completing the first move on the TOL problems. This analysis showed an effect of Block ($F(3, 88) = 10.98, p < 0.001$) indicating that, with practice, subjects took less time before completing their first moves. No effect of Condition was observed ($F(1, 22) = 0.43, p > 0.05$) and the

Condition X Block interaction also failed to reach significance ($F(3, 88) = 1.99, p > 0.05$). Decomposition of the main effect of Block using the Tukey test indicates that the period of time needed before making the first move decreased from Block 1 to Blocks 4 and 5 ($p < 0.05$) in the RDM condition, and from Block 1 to Block 4 ($p < 0.01$) in the SEQ condition. In addition, subjects in the SEQ condition exhibited significant reductions in initial time between Blocks 2 and 4 as well as between Blocks 3 and 4 ($p < 0.05$) hence suggesting an effect of the repeating sequence of problems on the subjects' level of performance.

Planned comparisons using the same orthogonal contrasts as for the "Total Time" measure of performance were again applied to verify our three *a priori* hypotheses. The results of these analyses revealed a significant decrease in initial time from Block 1 to Block 5 in both the RDM ($F(1,17) = 12.44, p < 0.01$) and SEQ ($F(1,17) = 9.89, p < 0.01$) conditions. In accordance with our hypothesis, a significant difference was found between Blocks 2 and 4 in the SEQ condition ($F(1,17) = 9.71, p < 0.01$) but not in the RDM condition ($F(1,17) = 0.73, p > 0.05$), indicating a greater improvement in performance when a sequence of problems was presented than when each problem was different on each trial. Contrary to our prediction, however, the performance of subjects in the SEQ condition did not change significantly from Block 4 to Block 5 ($F(1,17) = 0.64, p > 0.05$), suggesting that subjects did not take significantly more time before responding once the sequence was removed. Nevertheless, taken together, these results strongly suggest an effect of the repeating sequence on the initial time needed before completing the TOL problems.

Insert Figure 4 about here

Number of moves

A two-way ANOVA for repeated measures performed on the number of moves needed to complete the TOL problems (Condition X Block) in the five blocks of trials revealed a significant Condition X Block interaction ($F(3, 118) = 3.29, p < 0.05$). The main effects of Block ($F(3, 118) = 2.47, p > 0.05$) and Condition ($F(1, 29) = 0.86, p > 0.05$), however, did not reach significance. *Post hoc* comparisons using the Tukey procedure did not yield any significant difference between the two conditions. Planned comparisons showed that only subjects in the RDM condition decreased their number of moves to complete the problems with practice from Block 1 to Block 5. However, subjects in the SEQ condition needed significantly fewer moves from Block 2 to Block 4 when the sequence was presented ($F(1, 17) = 11.89, p < 0.01$), while subjects in the RDM condition did not ($F(1, 17) = 0.61, p > 0.05$). These results suggest that the sequence had an effect on the number of moves needed to complete the problems. Furthermore, subjects in the SEQ condition used significantly more moves to complete the problems from Block 4 to Block 5 ($F(1, 17) = 11.72, p < 0.01$), suggesting that their performance decreased once the sequence was removed. No such decrease was seen in the RDM condition ($p > 0.05$).

 Insert Figure 5 about here

Declarative knowledge of the sequence

A qualitative analysis of the answers on the short questionnaire revealed that subjects used specific strategies to resolve the task. Examples of strategies reported included: “I tried to think about it before I did it”, or “I tried to “save” a ball to be placed at the bottom of a socket by placing it at the top of another socket”. In the SEQ condition, it was found that, in general, most subjects were aware that certain problems were repeated. However, very few were able to give specific details about the repeating problems, such as the starting position or the particular moves that composed their solution. Furthermore, few subjects noticed any change from Block 4 to Block 5 when the

sequence was removed. In fact, out of 18 subjects, only four of them had acquired some declarative knowledge of the repeating problems because they (1) were able to give specific details about the repeating problems, (2) noticed a difference between the conditions of presentation of the problems in Blocks 4 and 5, and (3) realized they had completed the same configurations of problems that changed only with respect to the colors. Based on these findings, analyses were run again excluding the performance of these four subjects in order to determine whether the level of declarative knowledge of the sequence influenced significantly the learning effect observed on this task. The results of these analyses yielded a pattern identical to the one found with the group as a whole. The learning effect observed in the first analysis was therefore not due to the performance of the subjects who had acquired a better declarative knowledge of the repeating sequence.

Insert Table 3 about here

Discussion

This experiment yielded two major findings. First, all subjects, regardless of the condition in which they were trained, demonstrated a significant learning effect on the TOL task. Second, the administration of an embedded repeating sequence of problems influenced the pattern of learning. Together, these results provide the first evidence that the TOL task can be a useful tool to assess cognitive skill learning.

Significant learning of the skill necessary to solve more efficiently the TOL problems was demonstrated by all subjects, as evidenced by significant changes in the three dependent variables measured on this task. From Block 1 to Block 5, subjects in both conditions demonstrated a significant reduction in total time needed to solve the problems, a decrease in the initial time before the first move was completed, and a fewer

number of moves to solve the puzzles. Both groups reached a similar level of skill during practice, as evidenced by the fact that no significant difference in performance was found with any of the dependent variables on the last block of practice (Block 5). Because on Block 1 both groups were also comparable in skill level, this result suggests that, regardless of the condition, subjects demonstrated similar initial ability to execute the task.

The learning curve, however, was different in both groups of subjects. Indeed, subjects in the SEQ condition demonstrated a significant improvement on measures of total time, initial time, and number of moves between Blocks 2 and 4, when the sequence was presented. By contrast, subjects in the RDM condition did not show such improvement between these blocks of trials. Furthermore, subjects in the SEQ condition demonstrated a significant change in performance from Block 4 to Block 5, both in terms of the total time and the number of moves when the sequence was removed, whereas no such change was observed in the RDM condition. Unlike the two other dependent variables, the measure of initial time did not change from Block 4 to Block 5. This may reflect that subjects did not notice that the problems were different from those of the previous blocks, as they did not take significantly more time to think or plan before initiating their first moves. However, the change in the number of moves and total time indicates that subjects were less efficient when different problems were again presented.

Together, these results clearly indicate that the repetition of a sequence improves subjects' performance at this task, while a decrease in performance is observed when the sequence is removed. This suggests that the improvement seen in the SEQ condition reflects the learning of procedures that are specific to the three repeated problems.

Experiment 2

The objective of this study was to examine cognitive skill learning with a within-subjects design using both repeated and non-repeated problems of the TOL task. To this end, an experimental paradigm inspired by the Hebb's Recurring Digits test (Hebb, 1961; Milner, 1970) was used. Typically, in this task, subjects are asked to recall verbally a series of digits (Lezak, 1995). Unbeknown to them, however, every third series is repeated, while on every other trial, the set of numbers differ. Early studies with this paradigm have shown that normal control subjects form a memory trace of the repeating list as significant improvement in recall is observed for the repeating series of digits, but not for the non-recurring ones (Hebb, 1961; Schwartz & Bryden, 1971). In the present experiment, we thus presented subjects with a series of TOL problems, where every third problem was repeated. It was hypothesized that performance on both repeated and non-repeated problems would increase significantly across blocks of practice, but that after training, performance on the repeated problems would be significantly better than on the non-repeated problems.

Method

Subjects

Fourteen normal control subjects (7 female, 7 male) participated in this study. They averaged 25 years of age (SD: 4.62) and 15.07 years of education (SD: 1.44), and their scores on the Visual Memory Span subtest of the Wechsler Memory Scale-Revised were within normal limits (Mean score: 14.93, SD: 2.70). Twelve subjects were right-handed and two were left-handed (16.7 %).

Material and Stimuli

The subjects' ability to acquire a cognitive skill was measured with the same computerized version of the TOL test as in Experiment 1. The stimuli were also displayed in the same manner as in Experiment 1. However the positions of the colored balls in both the model and working displays were predetermined as to create problems requiring only 4 or 5 moves to be completed. Again, subjects were required to plan the solution to the problems mentally before making any displacements of the balls in order to complete each problem in as fewer number of moves as possible.

Procedure

The training session lasted approximately 60 minutes including rest periods. As in Experiment 1, subjects were given instructions and familiarization trials on the TOL task. Table 4 summarizes the experimental design. All subjects completed 45 problems requiring either 4 or 5 moves to be solved. The order of presentation of the problems was set such that a 4-move problem was always followed by two 5-move problems. Unbeknown to the subjects, one of the 5-move problems was repeated on every third trial. Therefore, subjects performed the repeating problem a total of 15 times. At the end of the training session, subjects were asked to explain verbally the nature of the strategies they used to solve the TOL task. They were also asked to respond to a short-questionnaire similar to the one used in Experiment 1. Finally, a new recognition test was administered to those subjects who noticed a repetition to assess the level of declarative knowledge acquired about the repeated problem. In this test, three different configurations of TOL problems were presented, one at a time for 10 seconds, and the subjects had to choose the one that they thought represented the repeated problem.

Insert Table 4 about here

Performance Indices and Data Analyses

As in Experiment 1, the performance indices used to measure the amount of learning on this new version of the TOL task were: (1) the total time in seconds used to complete a problem, (2) the initial time in seconds before the first move was executed, and (3) the total number of moves used to complete the problems. Again, statistical significance was determined using an alpha level of 0.05.

Only the data of the 5-move problems were analyzed in order to compare the performance on the repeated problems with that on the non-repeated problems. The data of the 15 individual trials were averaged over blocks of three trials. Therefore, the statistical analyses were conducted using this mean score across five blocks of trials. The data were analyzed using a 2 X 5 (Condition X Block) ANOVA for repeated measures, in which both Condition and Block were treated as within-subject factors. The degrees of freedom in the ANOVAs were also transformed using the Greenhouse-Geisser procedure for possible heterogeneity of covariance.

Again, planned comparisons corrected with the Bonferroni procedure for multiple comparisons were used to allow a more detailed analysis of the pattern of learning in both experimental conditions and to verify our *a priori* hypotheses that:

(1) regardless of condition, subjects would improve significantly their performance with practice on the task.

(2) the subjects' performance in both conditions would not differ on Block 1, while it would be significantly better in the repeated condition than in the non-repeated condition on Block 5.

Results

The results of Experiment 2 are presented separately for each dependent measure (total time, initial time, and number of moves) in Figures 6, 7, and 8. The results of the planned comparisons are summarized in Table 5.

Cognitive Skill Learning

Total time

A two-way ANOVA for repeated measures (Condition X Block) performed on the total time to complete the TOL problems over the five blocks of trials yielded a significant main effect of Block ($F(3, 42) = 7.67, p < 0.01$). However, both the main effect of Condition ($F(1, 13) = 0.0006, p > 0.05$) and the Condition X Block interaction ($F(3, 41) = 0.78, p > 0.05$) did not reach significance. *Post hoc* comparisons using the Tukey test were used to decompose the significant main effect of Block. These analyses revealed significant decreases in the total time to complete the problems from Block 1 to Block 4, as well as from Block 1 to Block 5 when both conditions were analyzed together ($p < 0.05$), hence suggesting a significant improvement in performance on the TOL task with practice.

Planned comparisons with Bonferroni corrections showed that subjects needed significantly less time to complete the repeated problems from Block 1 to Block 4 ($F(1, 13) = 10.97, p < 0.01$) as well as from Block 1 to Block 5 ($F(1, 13) = 17.83, p < 0.01$). However, no such difference was seen for the non-repeated problems ($p > 0.05$). No significant difference in performance was observed between the two conditions on Block 1 nor on Block 5 ($p > 0.05$). These results suggest that the repetition of the problem may have had an effect on the total time needed to complete the problems, but this effect was not robust enough to show a significant difference between conditions after a limited amount of training trials completed by Block 5.

Insert Figure 6 about here

Initial time

The two-way ANOVA for repeated measures (Condition X Block) and the planned comparisons on the initial time to complete the TOL problems did not reveal any significant effects of Condition, Block, or Condition X Block interaction ($p > 0.05$). These results suggest that subjects did not show any significant reduction in the initial time before making a move after practice on either the repeated or the non-repeated problems.

Insert Figure 7 about here

Number of moves.

Again, the two-way ANOVA with repeated measures (Condition X Block) and the planned comparisons failed to show any differences between blocks or conditions in terms of number of moves necessary to complete the TOL problems.

Insert Figure 8 about here

Declarative knowledge of the sequence

Qualitative analyses of the subjects' answers on the short questionnaire revealed that subjects used specific strategies to resolve the task, similar to those employed by subjects in Experiment 1. Twelve out of 14 subjects noticed that some of the problems were repeated. On the recognition test, four out of 12 subjects chose the target problem.

However, only two of these subjects were able to give details about the problem, suggesting that the other two subjects may have chosen the repeated problem by chance. Further analyses excluding the results of the two subjects who acquired declarative knowledge of the solution to the repeating problem yielded a pattern of findings very similar to the one obtained with the results of the entire group of subjects. Indeed, a significant decrease in total time was observed from Block 1 to Block 5 with the repeated problems ($p < 0.05$) but not with the non-repeated problems. No other significant result was found with the other dependent measures. These findings suggest that the declarative knowledge of these subjects did not influence the learning effect observed on the total time to complete the problems in the repeating condition.

Insert Table 5 about here

Discussion

Contrary to the results of Experiment 1, no robust increase in performance due to practice on the TOL problems was observed in this study. It should be noted, however, that subjects were given fewer trials of practice at this task than in Experiment 1 (45 trials in Experiment 2, compared with 75 trial in Experiment 1), and that the problems were less difficult as no 6-move problems were administered. *Thus*, the effect of the repetition may have been masked by on-going general learning of the task. Overall, subjects demonstrated some learning of the skill as evidenced by a significant decrease in total time taken to resolve the problems. No such decrease, however, was seen in initial time or number of moves. The results of Experiment 2 are nevertheless in line with those of Experiment 1 because a significant reduction in total time from Block 1 to Block 5 was seen for the repeated problems but not for non-repeated ones. The latter finding supports the hypothesis that differential learning occurs on the two types of problems.

General Discussion

In the present studies, two different experimental designs were employed to examine individuals' ability to develop a new problem-solving skill. The first experiment used a sequence learning paradigm to measure the effect of practice of an embedded sequence of TOL problems on learning the necessary skills to perform effectively a task that requires both planning and working memory capacities. The performance of subjects exposed to random problems was compared to that of subjects presented with a repeating sequence of three problems. The results reveal that subjects in both random and sequence conditions improved their performance on this task with practice. This suggests that exposure to such problems can, by itself, trigger changes in a subject's capacity to use the mental operations necessary to solve this type of problem. However, the present findings also show that, after several repetitions of a sequence of TOL problems, the subjects further increased their efficacy at developing new sets of rules and strategies to perform this task. By contrast, the second experiment used a within-subject design and attempted to demonstrate whether different patterns of learning could be observed when subjects were presented with a single repeating problem and several other non-repeating problems. Contrary to what was found in Experiment 1, the results did not yield a similar pattern of findings as a learning effect was found on the measure of total time only. This lack of practice effect on the other dependent measures could be due to the fact that too few repetitions of the 5-move problem were administered to trigger the changes in cognitive processes needed to perform more efficiently the repeated problem. Yet, the results of the second study are in line with those of Experiment 1, because subjects needed significantly less time to complete the repeating than the non-repeating problems as a function of practice. Together, the results of these two studies suggest that subjects' performance on the TOL task can significantly improve following repetitive presentations of planning problems.

The first objective of these studies was to examine the characteristics and the course of learning on the TOL task. In Experiment 1, subjects learned with training to complete each problem faster, to take less time to think about or plan a solution, and to

resolve the different puzzles using fewer moves. These findings are in accord with a large number of studies that have examined cognitive skill learning in normal control subjects using a variety of paradigms (see Newell & Rosenbloom, 1981, for a review). Furthermore, our results are consistent with previous studies using the Tower of Hanoi, which show that subjects exhibit a significant improvement in solving the puzzle after repeated exposure to this task (Beatty et al. 1987; Butters et al., 1985; Cohen et al., 1985; Saint-Cyr et al., 1988). Thus, this pattern of findings indicates that this new version of the TOL task constitutes a valid measure of an individual's ability to acquire a new cognitive skill. Because this task allows the possibility to study performance using different dependent variables and to present subjects with a large number of problems varying in difficulty level, the TOL test is also thought to represent an adequate laboratory measure of the cognitive skills that are regularly used in everyday situations.

The second objective of these experiments was to shed some light on the different learning mechanisms elicited during acquisition of the cognitive skill necessary to perform effectively the TOL task. One of the main components of skill acquisition put forward by the present results, is that subjects demonstrated a significant acceleration in the time taken to elaborate mentally a solution to the TOL problems. Consistent with other neuropsychological studies (Owen, 1997; Owen et al., 1996), this learning effect was reflected by a gradual decrease in the subjects' initial time before making the first move over the course of practice. Because the subjects were instructed to try to plan a solution to the problem in order to complete it in the minimum number of moves, it is reasonable to believe that this dependent measure provides a good indicator of the subjects' initial planning ability to solve such problems. Such a pattern of findings is in accord with other studies on cognitive skill learning that have reported a reduced latency to respond to electronic problems using the Digital Logic Gates Test (Woltz, 1988) and a shorter period of time needed to give a response to problems requiring complex mathematical operations (Charness et al., 1988). Our results disagree, however, with those collected in a group of physic experts who, despite solving problems four times faster than novices, spent more time analyzing and trying to understand the problems at hand (Chi, Feltovitch, & Glaser, 1981). The latter observation suggests that processes

underlying the increase in performance may be different depending on the type of cognitive skill required to solve some problems. On certain types of tasks, for example, improvement in cognitive ability may result in faster planning and thinking time, whereas in others, a high level of skill may be characterized by the capacity to analyze more thoroughly, but yet more efficiently, the demands of the task. Another important mechanism of skill acquisition observed in this study was an increase in efficiency at carrying out a solution as subjects showed a significant reduction in the number of moves needed to complete the TOL problems after practice. This replicates the findings from studies using the Tower of Hanoi task, which indicate that normal control subjects can learn to solve this puzzle using a decreasing number of disk displacements (Beatty et al. 1987; Butters et al., 1985; Cohen et al., 1985; Saint-Cyr et al., 1988).

The fact that subjects did speed up their initial thinking time and increased their efficiency at carrying out the solutions to a problem fits well with the processes described by Anderson and his colleagues (Anderson et al., 1981). These authors propose that one's ability to solve problems can be separated into a *planning* stage, where subjects attempt to find a plan for a solution to the problem, and an *execution* stage, where they transpose plans into actions. Although, conceivably, subjects may switch back and forth between the planning and the execution phases when trying to solve a problem, Anderson and his colleagues have argued from both a theoretical and an empirical point of view that these two stages are distinct, with planning being the more demanding, and execution being the more mechanical aspect of this type of learning. Thus, the results of the present studies suggest that processes involved in both the planning and execution stages become modified with repeated practice on the TOL task, and that these two mechanisms interact constantly in order to allow the subjects to acquire gradually the capacity to respond more adequately to problems solving situations.

Because the process of planning a solution is strongly related to that of executing the different steps of a particular task, this calls for caution in interpreting the role that each of these two learning mechanisms may have in the acquisition of a new cognitive skilled behavior. A short initial time before making a move does not necessarily mean that a subject has acquired a greater capacity to think ahead when solving a problem, as

this could also reflect insufficient planning, or even, poor planning on his or her part. An analysis of the information provided by these two learning mechanisms, however, can generate interesting hypotheses about the actual nature of the learned skill. In fact, the elaboration of such "profiles" can be useful in determining the nature of the cognitive skill learning deficits, and can help develop specific training strategies that target the deficient components of the task. For example, a short initial thinking time combined with the use of a minimum number of moves when executing the TOL task could suggest that a good level of learning has been acquired with training. By contrast, a short initial planning time in combination with the use of superfluous moves to solve the puzzles could be an indication that insufficient planning has occurred and that subjects need to adapt their strategies as the solution is carried out. In general, the subjects in our studies showed both a reduced initial thinking time and a gradual decrease to complete each trial. Such a pattern of findings suggests that they learned to plan more effectively the solutions to the TOL problems, and thus that they acquired a high level of proficiency at carrying out these plans with practice.

In addition to the results obtained with the measures of initial thinking time and number of moves discussed above, the total time needed to complete a problem provides other insights into the cognitive processes that individuals use when learning to solve new problems. The latter measure is more difficult to interpret because it reflects, not only the role of several distinct cognitive functions (e.g. working memory or visuo-spatial analysis) but, the contribution of the *interaction* between such processes to learning as well. Nevertheless, the total time to solve the TOL problems turned out to be the most robust indicator of learning in the present studies. This observation is consistent with Newell and Rosenbloom's (1981) review of studies with a wide variety of cognitive skill learning tasks who have reported that the time needed to complete an entire problem remains the index of choice for studying skill acquisition. This is also in accord with the results of Charness and Campbell (1988) who reported that the speedup in performance on separate sub-components of a mental calculation task, like using an algorithm to square two-digit numbers, accounts only for a small portion of the total improvement in performance on the task with practice. These authors found that the time spent on

resolving the individual parts of the algorithm accounted only for 20 to 33% of the total time needed to solve the whole mathematical operation. This suggests that a major portion of the variance attributable to the amelioration seen in the subjects' performance with training was due to an increased efficiency in managing the task and in activating the intermediate processes that allow to make more efficient links between the different components of an algorithm. Although it is difficult to identify the nature of such intermediate processes, one possible candidate in the TOL task, is the subjects' working memory capacity. Indeed, this task requires an active search of solutions and the generation of plans of actions, placing a significant load on working memory processes (Owen, 1997; Owen et al., 1992, 1996). Subjects need to constantly monitor and evaluate their moves, and to keep track mentally of the plans and actions they made. Working memory may therefore constitute one of the very important intermediate processes that are tuned during skill acquisition at the TOL task.

To summarize the second issue addressed by the present experiments, our findings allow us to suggest at least three mechanisms underlying the acquisition of a skill at resolving the TOL problems: (1) an acceleration of the planning phase where subjects construct a solution more effectively, probably through faster analysis and comprehension of the problem, (2) an increase in efficiency in the execution phase, where subjects come to carry out their plans more and more effectively with less superfluous behaviors, and finally, (3) an acceleration of intermediate processes, which probably include working memory capacities, that allow to monitor the subjects' behavior in order to link together the appropriate plans and strategies needed for the intended actions.

In light of the findings reported above, it may be argued that, by the end of the training session, subjects were in the second (proceduralisation) stage of cognitive skill acquisition. Indeed, the increase in the subjects' efficiency at using the rules, procedures, and strategies pertaining to the TOL task, fit well into the theoretical accounts of several researchers (e.g. Anderson, 1982, 1990; Cheng, 1985; Rosenbloom & Newell, 1987) who have proposed that different components of a skill become reorganized into more effective units after practice. By the end of the second block of practice, none of the

subjects needed to be reminded of the rules or instructions of the task, thus indicating that they had completed the first stage of learning and integrated the declarative knowledge needed to complete the task. With prolonged practice at the TOL task, it is possible that the subjects could have eventually reached the third or autonomous stage of learning, where the solutions to the problems would have been executed automatically and would have placed very limited demands on attention and working memory capacities. But until additional research is conducted, such an interpretation must remain conjectural.

The third objective of the present studies was to address the issue of specificity of the cognitive skill that was acquired with practice on the TOL task. Our results indicate that performance on a cognitive skill learning task can be enhanced by introducing repeating elements. In Experiment 1, two sources of evidence support this claim. First, the introduction of a sequence of problems during Blocks 2, 3, and 4, led to significant reductions in total time, initial time, and number of moves, whereas little improvement was seen across these same blocks when other subjects were asked to resolve a different problem on each trial. Second, the removal of this sequence produced a negative transfer effect as subjects' performance returned to a level identical to that of subjects who were always facing different problems. Thus, the results of Experiment 1 provide the first evidence that a cognitive skill can be measured with a sequence learning paradigm. These results are in accord with those of Nissen & Bullemer (1987) who reported that a significant decrease in reaction time on a visuomotor sequence learning task can be observed when the presentation of stimuli follow a specific sequence, but not when stimuli are displayed in a random order. This suggests that the learning of a specific sequence of events can be dissociated from the more general ability to respond to stimuli that is acquired in the random condition. Similarly, the results of our studies support the idea that additional improvement in performance due to the presentation of repeated items can thus be attributed to the acquisition of a skill that is specific to the sequence of problems, and that is over and above the development of a more general ability in executing the TOL task. Further research will be needed to determine which repeated components of the task enhance performance. The effect of repetition on performance

probably works on both global strategies to resolve the TOL task, as well as on individual strategies to resolve sub-goals of the problems.

Our pattern of findings have several repercussions with regards to the type of training that would be most appropriate when learning a new cognitive skill. In a given work setting, for example, the advantage of practicing the same task over another form of training in which a variety of different problems are practiced on each session, would depend on the nature of the objective to be reached. If the task is fixed and does not vary, a worker could benefit from training on the same repetitive task in order to maximize his or her performance. If the task requires better problem-solving abilities, however, a training condition involving different problem-solving situations might be more beneficial, because it would allow more flexibility in the person's thinking. Indeed, our results show that once subjects are retested in a random condition after having been exposed to a sequence of problems during training, they can no longer apply the fixed strategies developed in previous blocks with the same efficiency, but rather, they have to use more varied strategies to face new problems.

In our experiments, the increase in performance with the repeating problems was not due to the fact that subjects developed explicit knowledge of the solutions to these problems with practice. Although subjects could, sometimes, explicitly describe some of the strategies they used to resolve the problems, they did not know the solutions to the repeating problems from memory. In fact, even though most subjects noticed that some problems were repeated, very few were able to give details about them. Furthermore, none of the subjects were able to generate the solution to a problem without having to refer to the model display. Altogether, this suggests that subjects had to go through the whole problem-solving sequence on every trial, and therefore, that they had to engage into the procedural learning processes that allow the elaboration and use of effective strategies. When further analyses were conducted excluding the subjects who noticed that some problems were repeated and were able to give some details about them, the pattern of results was identical to the ones with the entire group, suggesting that declarative knowledge of the solutions did not contribute to the increase in performance observed, and that the learning of rules and strategies to solve such problems was implicit in nature.

These findings are consistent with studies demonstrating that amnesic patients can acquire cognitive skills normally despite having no explicit recollection of the information learned over the training sessions (Brooks & Baddeley, 1976; Charness et al., 1988; McGlinchey-Berroth et al., 1989; Cohen et al., 1985; Gabrieli, Keane, & Corkin, 1987; Beaunieux et al., 1998).

In conclusion, the present findings provide evidence that the TOL task is not only useful as a tool to measure procedural learning, but that also allows to gain insight into the mechanisms that underlie cognitive skill acquisition. In this new version of the TOL test, subjects learned to use the proper strategies, rules, and procedures pertaining to this task with practice, in order to plan the best solutions to the problems and to carry them out more effectively. Furthermore, our findings demonstrate that the use of sequence learning paradigms allows to study the development of a specific set of mental operations that can be differentiated from a more general ability at resolving the TOL task. In future research, it would be interesting to use this new adaptation of the TOL test to study other phases of learning such as the consolidation and retention of a skill , and to use the modern brain imaging techniques (e.g. Positron Emission Tomography and functional Magnetic Resonance Imaging) to examine the neural substrates of the different mechanisms involved in the learning of cognitive skilled behavior. Finally, this new task could be useful to develop training programs to enhance performance on cognitive tasks after damage to the human brain.

References

- Anderson, J.R. (1982). Acquisition of cognitive skill. Psychological Review, 89, 369-406.
- Anderson, J.R. (1983). The architecture of cognition. Harvard: Harvard University Press.
- Anderson, J.R. (1987). Skill acquisition: Compilation of weak-method problem solutions. Psychological Review, 94, 192-210.
- Anderson, J.R. (1990). Cognitive psychology and its implications (3rd ed.). New York: Freeman.
- Anderson, J.R., & Fincham, J.M. (1994). Acquisition of procedural skills from examples. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 20, 1322-1340.
- Anderson, J.R., Farrell, R., & Sauers, R. (1984). Learning to program LISP. Cognitive Science, 8, 87-129.
- Anderson, J.R., Fincham, J.M., & Douglass, S. (1997). The role of examples and rules in the acquisition of a cognitive skill. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 23, 932-945.
- Anderson, J.R., Greeno, J.G., Kline, P.J., & Neves, D.M. (1981). Acquisition of problem solving skill. In J.R. Anderson (Ed.), Cognitive skills and their acquisition. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Anzai, Y., & Simon, H.A. (1979). The theory of learning by doing. Psychological Review, 86, 124-140.

Beatty, W.W., Salmon, D.P., Bernstein, N., Martone, M., Lyon, L., & Butters, N. (1987). Procedural learning in a patient with amnesia due to hypoxia. Brain & Cognition, 6, 386-402.

Beaunieux, H., Desgranges, B., Lalevee, C., De la Sayette, V., Lechevalier, B., & Eustache, F. (1998). Reservation of cognitive procedural memory in a case of Korsakoff's syndrome: Methodological and theoretical insights. Perceptual and Motor Skills, 86, 1267-1287.

Best, J.B. (1990). Knowledge acquisition and strategic action in "Mastermind" problems. Memory & Cognition, 18, 54-64.

Bordens, K.S., & Abbott, B.B. (1996). Research design and methods: A process approach (3rd ed.). Mountain View, CA: Mayfield Publishing Company.

Broadbent, D.E., & Aston, B. (1978). Human control of a simulated economic system, Ergonomics, 21, 1035-1043.

Broadbent, D.E., FitzGerald, P., & Broadbent, M.H.P. (1986). Implicit and explicit knowledge in the control of complex systems. British Journal of Psychology, 77, 33-50.

Brooks, D.N., & Baddeley, A.D. (1976). What can amnesic patients learn? Neuropsychologia, 14, 111-122.

Butters, N., Wolfe, J., Martone, M., Granholm, E., & Cermak, L. S. (1985). Memory disorders associated with Huntington's disease: Verbal recall, verbal recognition and procedural memory. Neuropsychologia, 23, 729-743.

Campbell, J.I.D., & Graham, D.J. (1985). Mental multiplication skill: Structure, process, and acquisition. Canadian Journal of Psychology, 39, 338-366.

Carlson, A.R., Sullivan, A.M., & Schneider, W. (1989). Practice and working memory effects in building procedural skill. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 15, 517-526.

Charness, N., & Campbell, J.I.D. (1988). Acquiring skill at mental calculation in adulthood: A task decomposition. Journal of Experimental Psychology: General, 117, 115-129.

Charness, N., Milberg, W., & Alexander, M.P. (1988). Teaching an amnesic a complex cognitive skill. Brain and Cognition, 8, 253-272.

Cheng, P.W. (1985). Restructuring versus automaticity: Alternative accounts of skill acquisition. Psychological Review, 12, 414-423.

Chi, M.T.H., Feltovich, P.J., & Glaser, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. Cognitive Sciences, 5, 121-152.

Clegg, B.A., DiGirolamo, G.J., & Keel, S.W. (1998). Sequence learning. Trends in Cognitive Sciences, 2, 275-281.

Cohen, N.J., & Corkin, S. (1981). The amnesic patient H.M.: Learning and retention of a cognitive skill. Society for Neuroscience Abstracts, 7, 235.

Cohen, N.J., Eichenbaum, H., Deacedo, B.S., & Corkin, S. (1985). Different memory systems underlying acquisition of procedural and declarative knowledge. Ann New York Academy of Science.

Daum, I., Schugens, M.M., Spieker, S., Poser, U., Schonle, P.W., & Birbaumer, N. (1995). Memory and skill acquisition in Parkinson's disease and frontal lobe dysfunction. Cortex, 31, 413-432.

DeGroot, A.D. (1965). Thought and choice in chess. The Hague: Mouton.

Doyon, J. (1997). Skill learning. International Review in Neurobiology, 41, 273-294.

Ericsson, K.A. (1985). Memory skill. Canadian Journal of Psychology, 39, 188-231.

Fasotti, L., Eling, P.A.T.M., & van Houtem, J. (1994). Categorization of arithmetic word problems by normals, frontal and posterior-injured patients. Journal of Clinical and Experimental Psychology, 16, 723-733.

Fitts, P.M. (1964). Perceptual-motor skill learning. In A.W. Melton (Ed.), Categories of human learning. New York: Academic Press.

Gabrieli, J.D.E., Keane, M.M., & Corkin, S. (1987). Acquisition of problem-solving skills in global amnesia. Society for Neuroscience Abstract, 13, 1455.

Glisky, E.L., & Schacter, D.L. (1988). Long-term retention of computer learning by patients with memory disorders. Neuropsychologia, 26, 173-178.

Glisky, E.L., & Schacter, D.L. (1989). Extending the limits of complex learning in organic amnesia: Computer training in a vocational domain. Neuropsychologia, 27, 107-120.

Glisky, E.L., Schacter, D.L., & Tulving, E. (1986). Computer learning by memory-impaired patients: Acquisition and retention of complex knowledge. Neuropsychologia, 24, 313-328.

Grafton, S.T., Hazeltine, E., & Ivry, E.E. (1995). Functional mapping of sequence learning in normal humans. Journal of Cognitive Neuroscience, 7, 497-510.

Hebb, D.O. (1961). Distinctive features of learning in higher animals. In J.F. Delafresnaye (Ed.), Brain mechanisms and learning. New York: Oxford University Press. pp 37-46.

Heller, J., & reif, F. (1984). Prescribing effective human problem solving: Problem description in physics. Cognition & Instruction, 2, 191-203.

Heuer, H. (1996). Dual-task performance. In O. Neumann, & A.F. Sanders (Eds.), Handbook of perception and action, Vol 3: Attention (pp. 113-153). London: Academic Press.

Howell, D.C. (1987). Statistical methods for psychology (2nd ed.). Boston: PWS-Kent Publishing Company.

Kirk, R.E. (1982). Experimental design (2nd ed.). Pacific grove, CA: Brooks/Cole Publishing Company

Knowlton, B.J., & Squire, L.R. (1994). The information acquired during artificial grammar learning. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 20, 79-91.

Knowlton, B.J., Mangels, J.A., & Squire, L.R. (1996). A neostriatal habit learning system in humans. Science, 273, 1399-1402.

Knowlton, B.J., Squire, L.R., & Gluck, M.A. (1994). Probabilistic classification learning in amnesia. Learning and Memory, 1, 106-120.

Kolers, P.A., & Duchnicky, R.L. (1985). Discontinuity in cognitive skill. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 11, 655-674.

Kyllonen, P.C., & Stephens, D.L. (1990). Cognitive abilities as determinants of success in acquiring logic skill. Learning and Individual Differences, 2, 129-160.

Larkin, J.H. (1985). Understanding problem representations and skill in physics. In S.F. Chipman, JW. Segal, & R. Glaser (Eds.), Thinking and learning skills: Vol 2. Research and open questions. Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Lezak, M. D. (1995). Neuropsychological assessment (3rd ed.). Oxford: Oxford University Press.

Logan, G.D. (1985). Skill and automaticity: Relations, implications, and future directions. Canadian Journal of Psychology, 39, 367-386

Logan, G.D. (1988). Toward an instance theory of automatization. Psychological Review, 95, 492-527.

McGlinchey-Berroth, R., Milberg, W.P., & Charness, N. (1989). Learning of a complex arithmetic skill in dementia: Further evidence for a dissociation between compilation and production. Cortex, 25, 697-705.

Milner, B. (1970). Memory and the medial temporal regions of the brain. In K.H. Pribram, & D.E. Broadbent (Eds.), Biology of memory. New York: Academic Press.

Newell, A., & Rosenbloom, P.S. (1981). Mechanisms of skill acquisition and the law of practice. In J.R. Anderson (Ed), Cognitive skills and their acquisition (pp. 1-55). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers.

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

Owen, A. M., James, M., Leigh, P. N., Summers, B. A., Marsden, C. D., Quinn, N. P., Lange, K. W., & Robbins, T. W. (1992). Fronto-striatal cognitive deficits at different stages of Parkinson's disease. Brain, 115, 1727-1751.

Owen, A.M. (1997). Cognitive planning in humans: Neuropsychological, neuroanatomical and neuropharmacological perspectives. Progress in Neurobiology, 53, 431-450.

Owen, A.M., & Doyon, J. (in press). The cognitive neuropsychology of Parkinson's disease: A functional neuroimaging perspective. To appear in: Parkinson's Disease (Advances in Neurology) G. Stern (Ed.).

Owen, A.M., Downes, J.J., Sahakian, B.J., Polkey, C.E., & Robbins, T.W. (1990). Planning and spatial working memory following frontal lobe lesions in man. Neuropsychologia, 28, 1021-1034.

Owen, A.M., Doyon, J., Petrides, M., & Evans, A.C. (1996). Planning and spatial working memory: A positron emission tomography study in humans. European Journal of Neuroscience, 8, 353-364.

Pauli, P., Lutzenberger, W., Rau, H., Birbaumer, N., Rickard, T.C., Yaroush, R.A., & Bourne, L.E.Jr. (1994). Brain potentials during mental arithmetic: Effects of extensive practice and problem difficulty. Cognitive Brain Research, 2, 21-29.

Pirolli, P.L., & Anderson, J.R. (1985). The role of learning from examples in the acquisition of recursive programming skills. Canadian Journal of Psychology, 39, 240-272.

Roncacci, S., Troisi, E., Carlesimo, G. A., Nocentini, U., & Caltagirone, C. (1996). Implicit memory in parkinsonian patients: Evidence for deficient skill learning. European Neurology, 36, 154-159.

Rosenbloom, P.S., & Newell, A. (1987). An integrated computational model of stimulus-response compatibility and practice. In Bower, G.H. (Ed) The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory, Vol. 21. (pp. 1-52). San Diego, CA: Academic Press.

Saint-Cyr, J.A., Taylor, A.E., & Lang, A.E. (1988). Procedural learning and neostriatal dysfunction in man. Brain, 111, 941-959.

Schwartz, M., & Bryden, M.P. (1971). Coding factors in the learning of repeated digit sequences. Journal of Experimental Psychology, 87, 331-334.

Shallice, T. (1982). Specific impairments of planning. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B298, 199-209.

Shiffrin, R.M., & Dumais, J.T. (1981). The development of automatisisation. In J.R. Anderson (Ed.), Cognitive skill and their acquisition (pp. 111-139). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Squire, L. R., & Frambach, M. (1990). Cognitive skill learning in amnesia. Psychobiology, 18, 109-117.

Vanier, M. (1991). Test de la Tour de Londres: Évaluation de la capacité de planification. Document de travail (version 2.0). Institut de réadaptation de Montréal, École de réadaptation de l'Université de Montréal.

Wechsler, D. (1987). Wechsler Memory Scale-Revised. Psychological Corporation: New York.

Woltz, D.J. (1988). An investigation of the role of working memory in procedural skill acquisition. Journal of Experimental Psychology: General, 117, 319-331.

Yap, R.L., & van der Leij, A. (1994). Testing the automatisisation deficit hypothesis of dyslexia via a dual-task paradigm. Journal of Learning Disabilities, 27, 660-665.

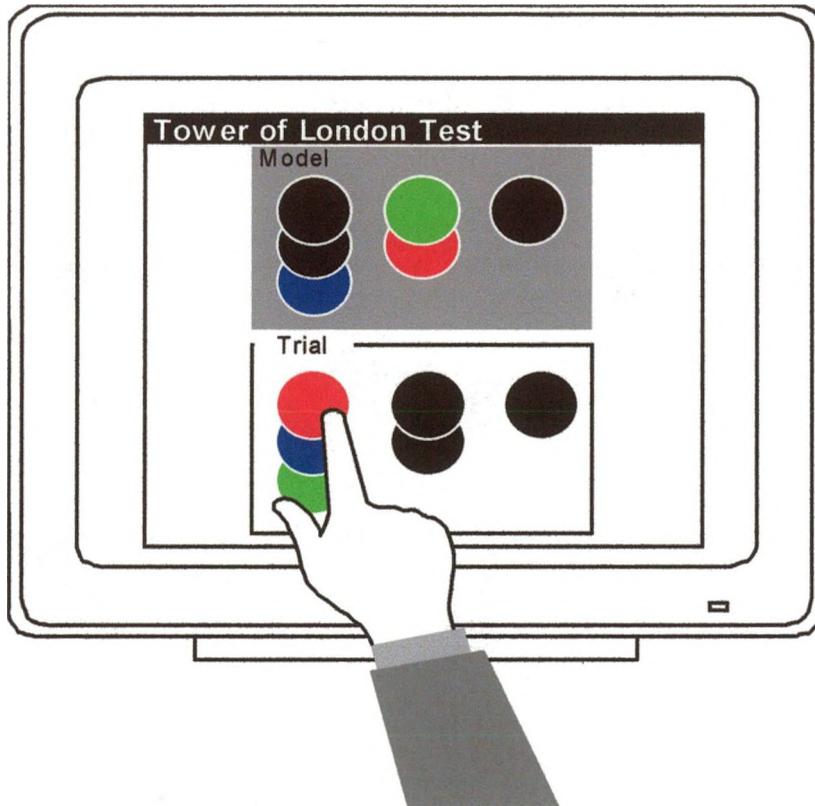


Figure 1: Schematic representation of the setup used to administer the computerized version of the Tower of London Task.

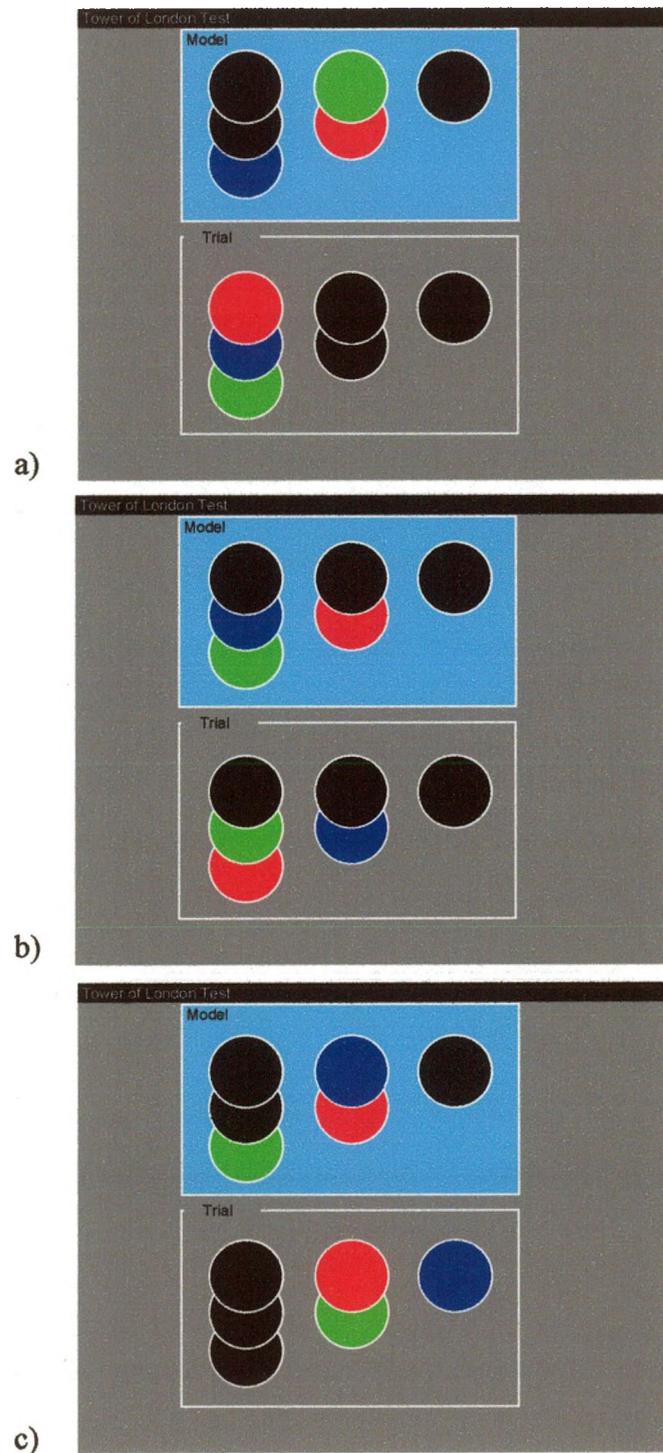


Figure 2: Examples of problems of the Tower of London at three levels of difficulty: (a) four-move problem, (b) five-move problem, and (c) six-move problem.

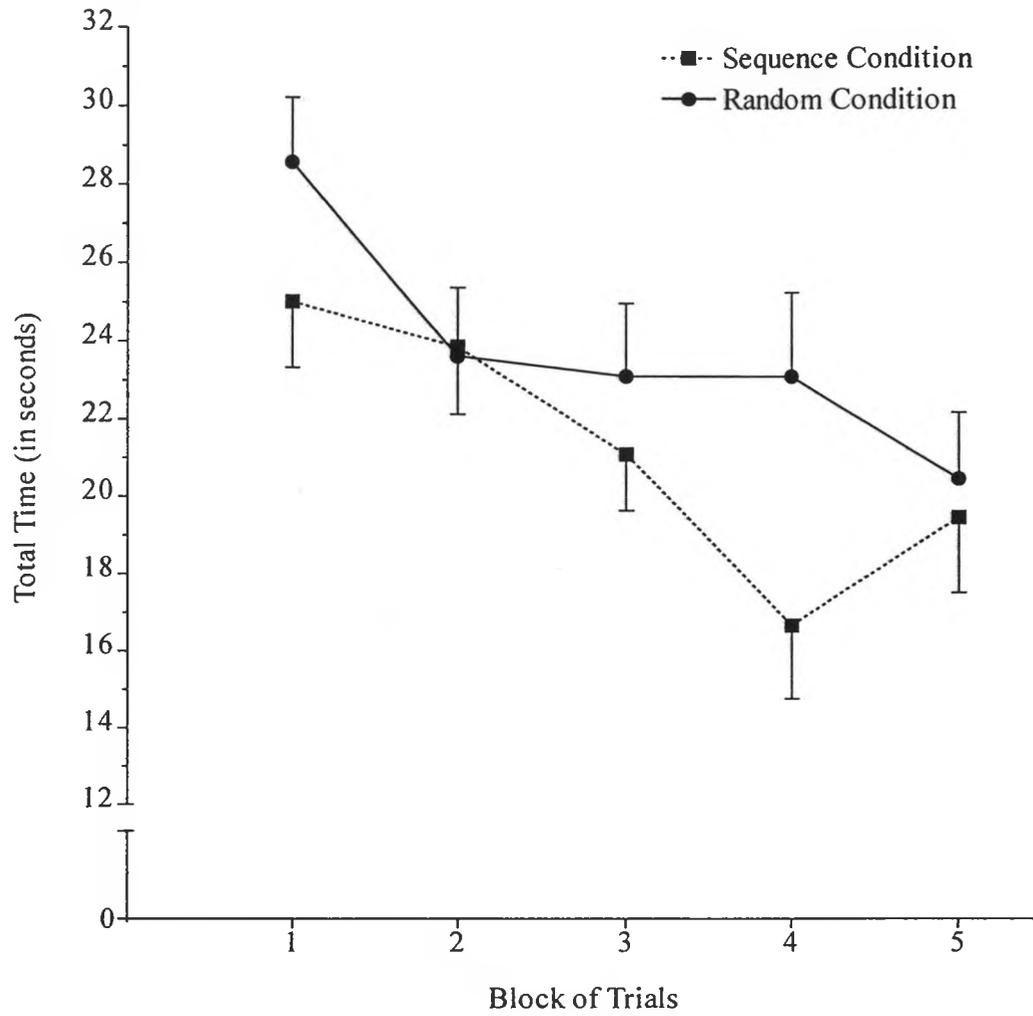


Figure 3: Results showing the mean total time taken to complete the TOL problems in both the RANDOM and SEQUENCE conditions across the five blocks of trials. Vertical lines depict standard errors of the means.

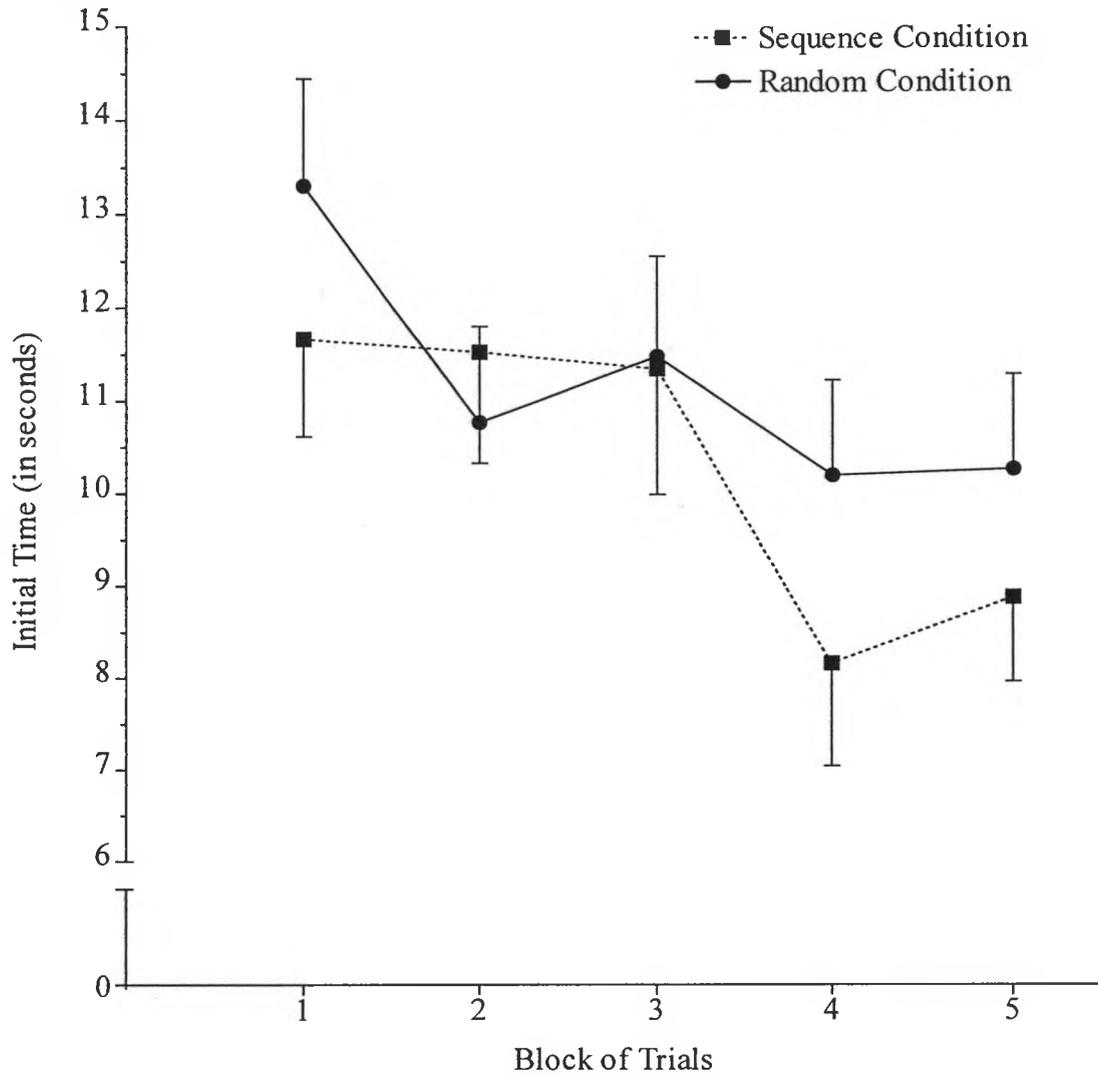


Figure 4: Results showing the mean initial time taken to complete the TOL problems in both the RANDOM and SEQUENCE conditions across the five blocks of trials.

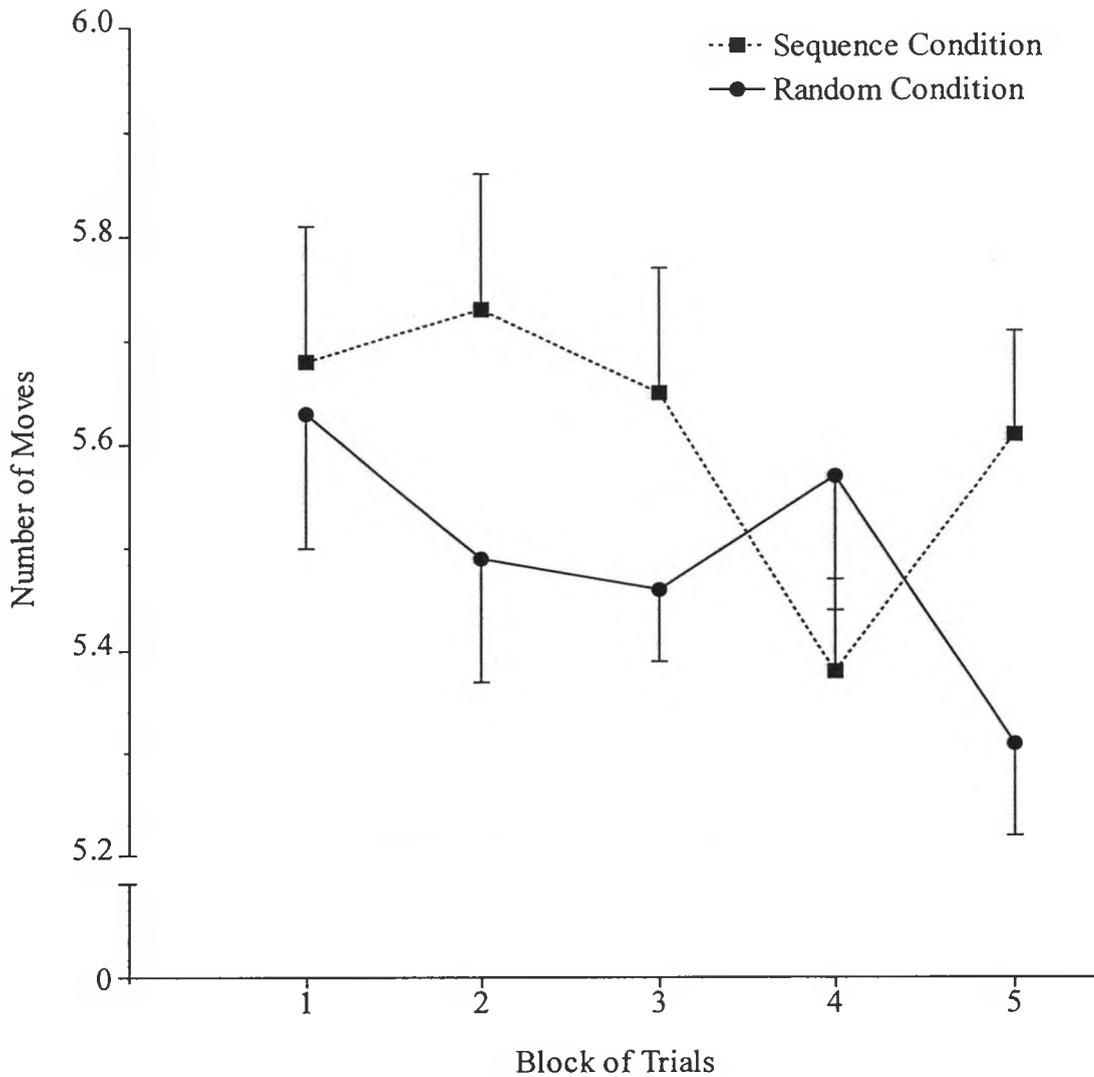


Figure 5: Results showing the mean total number of moves needed to complete the TOL problems in both the RANDOM and SEQUENCE conditions across the five blocks of trials.

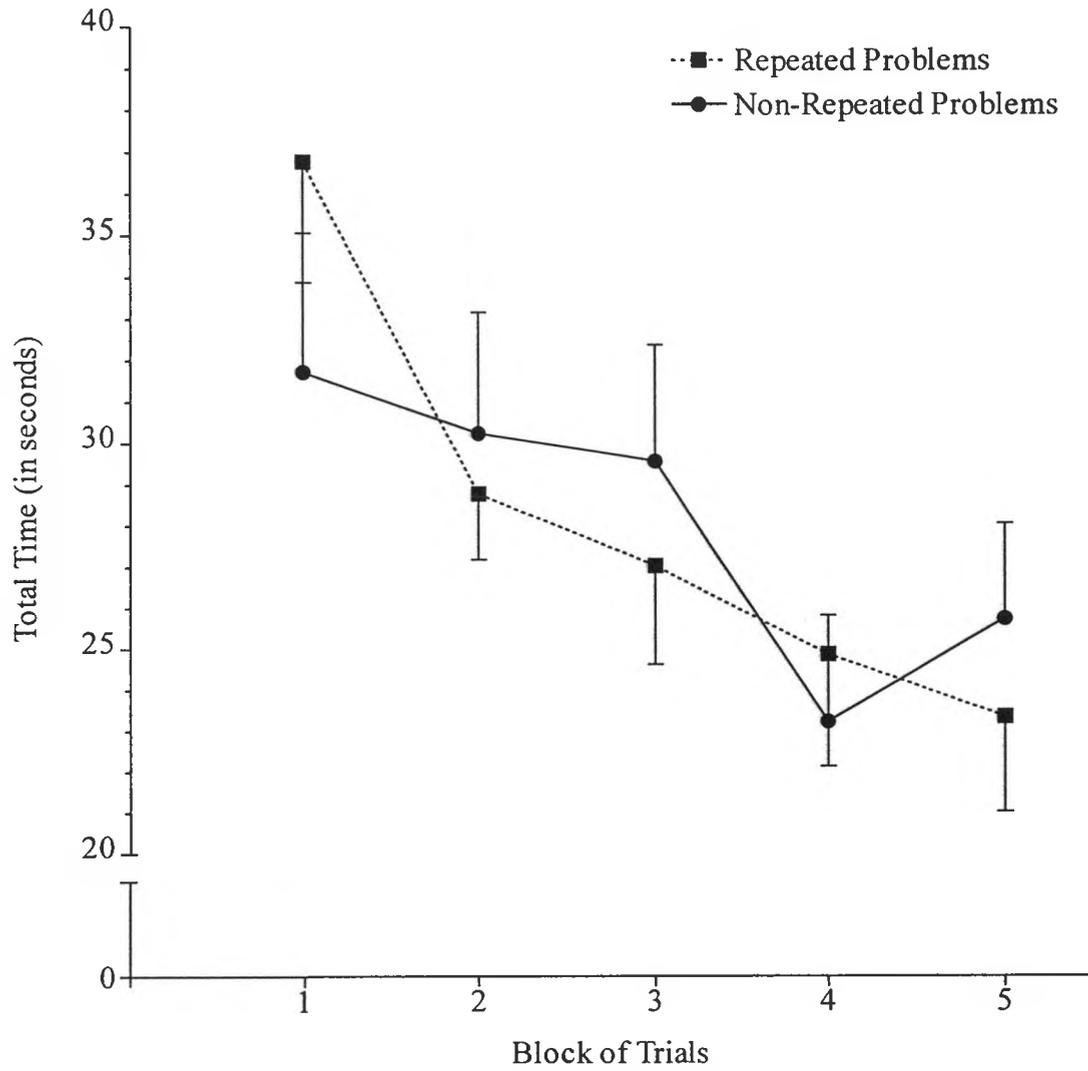


Figure 6: Results showing the mean total time taken complete both the REPEATED and NON-REPEATED problems.

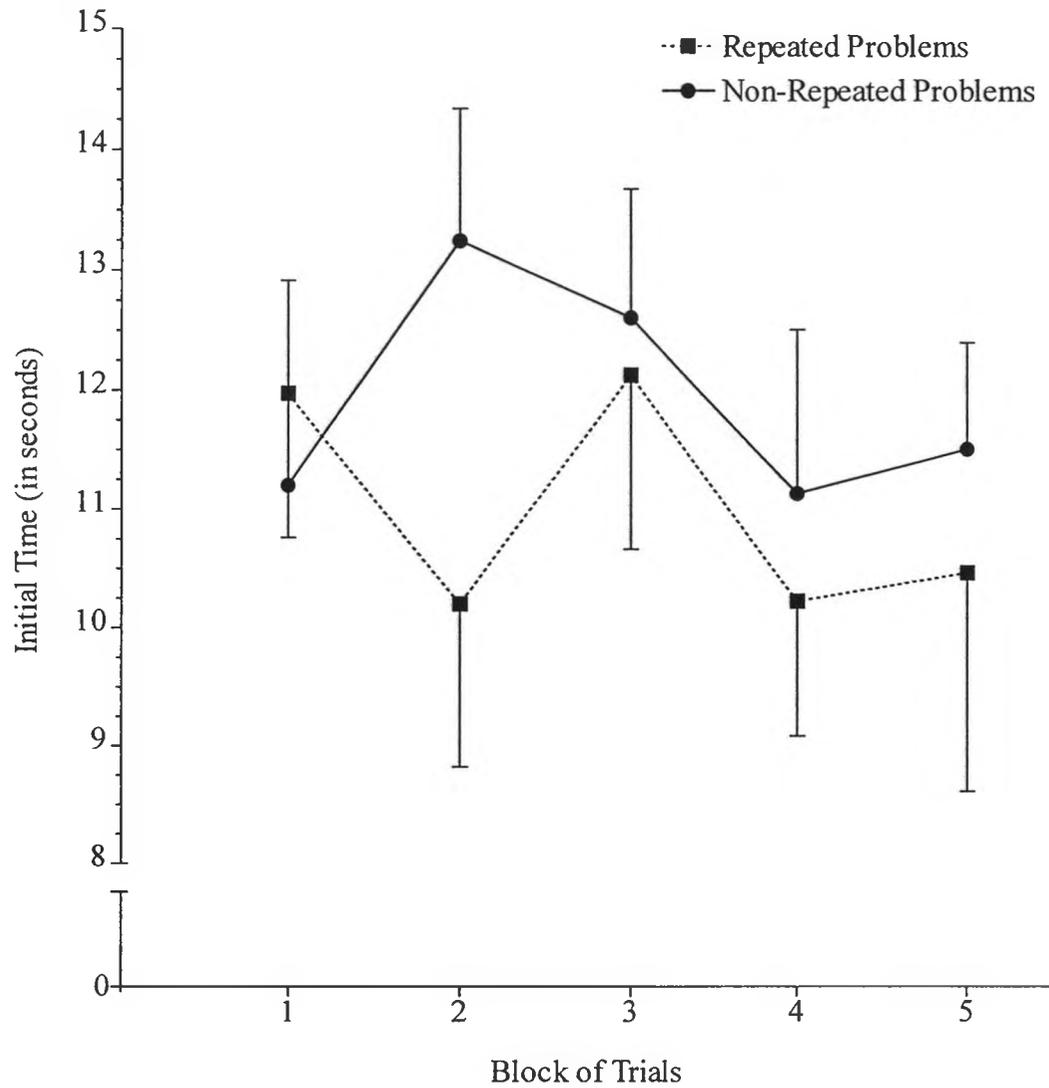


Figure 7: Results showing the mean initial time taken complete both the REPEATED and NON-REPEATED problems.

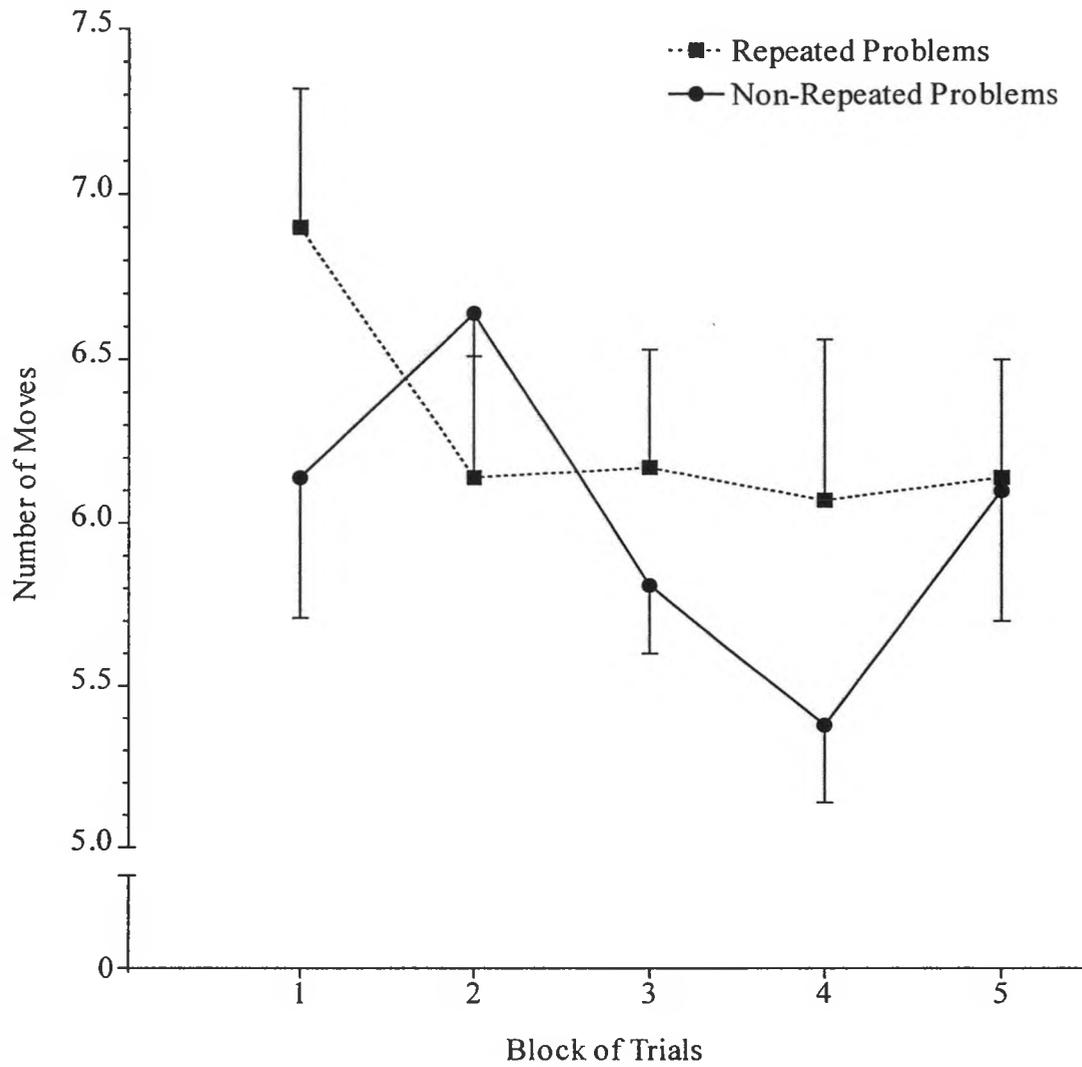


Figure 8: Results showing the mean total number of moves needed to complete both the REPEATED and NON-REPEATED problems.

Table 1. Summary of the experimental design used in Experiment 1.

	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4	Block 5
Group 1: RANDOM CONDITION	Different problems	Different problems	Different problems	Different problems	Different problems
Group 2: SEQUENCE CONDITION	Different problems	Repeating sequence of problems	Repeating sequence of problems	Repeating sequence of problems	Different problems

Table 2. Subject characteristics in the two experimental conditions.

	RANDOM Condition (N = 18)	SEQUENCE Condition (N = 18)
Age (years)	Mean: 24.17 (SD: 3.5)	Mean: 24.67 (SD: 5.7)
Education	Mean: 15.22 (SD: 1.6)	Mean: 14.56 (SD: 1.6)
Sex (female/male)	10 / 8	10 / 8
Dominance (right/left)	17 / 1	17 / 1
Block span score	Mean: 15.05 (SD: 2.2)	Mean: 14.93 (SD: 2.3)

Table 3. Summary of F values corrected with Bonferonni obtained in pairwise comparisons for the three dependent measures

Comparison	RANDOM Condition			SEQUENCE Condition		
	F (1, 17)			F (1, 17)		
	Total time	Initial time	Number of moves	Total time	Initial time	Number of moves
Blocks 1 vs 5 <i>(effect of practice)</i>	27.20*	12.44*	11.67*	10.82*	9.89*	0.78
Blocks 2 vs 4 <i>(effect of the sequence)</i>	0.15	0.73	0.61	22.72*	9.71*	11.89*
Blocks 4 vs 5 <i>(effect of removal of the sequence)</i>	5.70	0.027	5.08	7.09*	0.64	11.72*

* denotes significance at $p < 0.05$ ($F_{observed} > F_{critical}$ corrected with Bonferroni = 7.05)

Table 4. Summary of the experimental design used in Experiment 2.

Trial number:	Type of problem, condition:
1	4-move, non-repeated
2	5-move, non-repeated
3	5-move, repeated
4	4-move, non-repeated
5	5-move, non-repeated
6	5-move, repeated
...	...
43	4-move, non-repeated
44	5-move, non-repeated
45	5-move, repeated

Table 5. Summary of F values corrected with Bonferonni obtained in pairwise comparisons across blocks for the three dependent measures

Comparison	Repeated Problems			Non-Repeated Problems		
	$\underline{F}(1, 13)$			$\underline{F}(1, 13)$		
	total time	initial time	number of moves	total time	initial time	number of moves
Blocks 1 vs 4	10.97*	0.002	1.46	3.69	0.60	2.46
Blocks 1 vs 5	17.83*	0.015	1.45	2.07	0.71	0.005

* denotes significance at $p < 0.05$ ($\underline{F}_{observed} > \underline{F}_{critical}$ corrected with Bonferroni = 6.41)

CHAPITRE III

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion Générale

Les objectifs de ce mémoire étaient, d'une part, de faire la synthèse des connaissances acquises à ce jour sur l'apprentissage d'habiletés cognitives, et d'autre part, de pousser davantage ces connaissances dans ce domaine de recherche en développant une nouvelle tâche qui permettrait l'étude des différentes composantes d'une habileté cognitive, tout en demeurant comparable aux habiletés que nous acquérons dans la vie de tous les jours.

Deux études ont été complétées à l'aide d'une nouvelle version informatisée du Test de la Tour de Londres en utilisant deux schèmes expérimentaux différents. Ces études avaient pour buts d'examiner le cours et les caractéristiques de l'apprentissage d'une nouvelle habileté de résolution de problèmes par la pratique, de tenter de caractériser les processus qui sous-tendent l'apprentissage de cette habileté, et enfin de démontrer qu'un apprentissage spécifique des procédures et stratégies nécessaires pour résoudre plus efficacement une série de problèmes répétés peut être dissocié d'un apprentissage général à solutionner des problèmes requérant des habiletés de planification et de mémoire de travail. Tel que prévu, les résultats ont montré qu'une amélioration significative de la performance aux problèmes de la Tour de Londres est possible par la pratique. De plus, une analyse plus poussée des résultats nous a permis de proposer l'existence d'au moins trois mécanismes qui supportent le développement de l'habileté à résoudre ce type de problèmes, soit une accélération de la phase de réflexion ou de planification, une exécution plus efficace des plans élaborés, et une accélération des processus intermédiaires permettant le suivi et l'auto-correction de la performance. Enfin, les résultats ont montré qu'une séquence de procédures cognitives peut être apprise, tout comme une séquence de procédures visuomotrices, et que la performance peut être améliorée par un entraînement spécifique à une telle séquence.

Ces données ont des portées dans trois voies différentes. Premièrement, elles suggèrent que la Tour de Londres est un bon outil pour étudier l'acquisition d'une

nouvelle habileté cognitive en laboratoire. En effet, un premier avantage de cette tâche est qu'elle requiert des processus cognitifs variés que l'on utilise dans la vie de tous les jours lors de situations de résolution de problèmes. Elle permet également un entraînement à des problèmes différents en termes d'essais et de niveaux de difficulté de la tâche. Enfin, cette nouvelle épreuve a aussi comme avantage de mesurer quelques-unes des composantes de l'habileté à l'aide de plusieurs indices d'apprentissage comme le temps total et le nombre de mouvements pour résoudre un problème, ainsi que le temps initial de réflexion avant de commencer à effectuer la solution des différents problèmes, ce qui permet une meilleure compréhension des mécanismes qui sous-tendent l'acquisition de l'habileté.

Une seconde contribution des résultats de ces études concerne l'utilité de certaines conditions d'entraînement (problèmes répétés ou non-répétés) utilisées pour développer une habileté cognitive. Nos données suggèrent que la pratique de problèmes répétés améliore significativement la performance à ces mêmes problèmes. Par contre, cet apprentissage est spécifique à ces items et se différencie de l'amélioration de la performance à la tâche en général. Ainsi, dans un contexte de travail requérant la résolution de problèmes, par exemple, l'avantage d'un entraînement à différents problèmes plutôt qu'à des problèmes répétitifs dépendrait du type de tâche à effectuer. Si celle-ci est toujours fixe et peu changeante, un apprentissage spécifique pourrait maximiser la performance. Par contre, si la tâche est plus variable, un apprentissage général serait mieux adapté puisqu'il offre plus de flexibilité.

Enfin, les résultats des études présentées dans le cadre de ce mémoire permettent de proposer plusieurs avenues de recherche future qui pourraient enrichir nos connaissances du domaine de l'apprentissage des habiletés cognitives. D'abord, malgré une panoplie d'études sur divers types d'habiletés cognitives, les processus spécifiques impliqués dans les différentes phases d'apprentissage (lente vs rapide), dans la consolidation ou dans le transfert et la rétention d'opérations cognitives demeurent encore incompris. Plusieurs études restent donc à faire afin d'approfondir nos connaissances de

ces aspects auprès de sujets sains. Du côté de la neuropsychologie, les études effectuées à ce jour se sont contentées de documenter la présence ou l'absence de déficits d'apprentissage procédural cognitif chez diverses populations cliniques. À l'aide de tâches permettant une meilleure compréhension des différentes composantes des habiletés, comme la présente version de la Tour de Londres, il serait possible d'étudier la nature des processus qui sont les plus atteints dans différents types de pathologie. De telles recherches permettraient, d'une part, d'élucider le substrat neuroanatomique qui supporte les divers processus nous permettant d'acquérir des habiletés cognitives, et d'autre part, de contribuer à la réadaptation cognitive de différents patients en guidant le développement de programmes d'entraînement qui cibleraient les processus déficitaires. Enfin, des études d'imagerie cérébrale auprès de sujets sains et de patients permettraient également une meilleure compréhension des changements dynamiques (plasticité) et des différentes structures cérébrales associées à l'acquisition graduelle d'habiletés cognitives.

L'étonnante diversité des habiletés que nous développons depuis notre naissance et tout au long de notre vie constitue un domaine fascinant de l'étude du comportement humain. Il est donc possible de croire qu'une meilleure connaissance des processus cognitifs et des systèmes neuronaux impliqués dans l'apprentissage d'habiletés cognitives nous mènera, sans doute, à mieux comprendre le fonctionnement normal ou pathologique de la cognition, et à mieux utiliser ces mêmes habiletés dans notre environnement.

Bibliographie

Anderson, J.R. (1981). Cognitive skills and their acquisition. Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Anderson, J.R. (1982). Acquisition of cognitive skill. Psychological Review, 89, 369-406.

Anderson, J.R. (1983). The architecture of cognition. Harvard: Harvard University Press.

Anderson, J.R. (1987). Skill acquisition: Compilation of weak-method problem solutions. Psychological Review, 94, 192-210.

Anderson, J.R. (1990). Cognitive psychology and its implications (3rd ed.). New York: Freeman.

Anderson, J.R., & Fincham, J.M. (1994). Acquisition of procedural skills from examples. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 20, 1322-1340.

Anderson, J.R., Farrell, R., & Sauers, R. (1984). Learning to program LISP. Cognitive Science, 8, 87-129.

Anderson, J.R., Fincham, J.M., & Douglass, S. (1997). The role of examples and rules in the acquisition of a cognitive skill. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 23, 932-945.

Anderson, J.R., Greeno, J.G., Kline, P.J., & Neves, D.M. (1981). Acquisition of problem solving skill. In J.R. Anderson (Ed.), Cognitive skills and their acquisition. Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Anzai, Y., & Simon, H.A. (1979). The theory of learning by doing. Psychological Review, 86, 124-140.

Beatty, W.W., Salmon, D.P., Bernstein, N., Martone, M., Lyon, L., & Butters, N. (1987). Procedural learning in a patient with amnesia due to hypoxia. Brain & Cognition, 6, 386-402.

Beaunieux, H., Desgranges, B., Lalevee, C., De la Sayette, V., Lechevalier, B., & Eustache, F. (1998). Reservation of cognitive procedural memory in a case of Korsakoff's syndrome: Methodological and theoretical insights. Perceptual and Motor Skills, 86, 1267-1287.

Best, J.B. (1990). Knowledge acquisition and strategic action in "Mastermind" problems. Memory & Cognition, 18, 54-64.

Bordens, K.S., & Abbott, B.B. (1996). Research design and methods: A process approach (3rd ed.). Mountain View, CA: Mayfield Publishing Company.

Bracke-Tolkmitt, R., Linden, A., Canavan, A.G.M., Rockstroh, B., Scholz, E., Wessel, K., & Dienne, H.C. (1989). The cerebellum contributes to mental skills. Behavioral Neuroscience, 103, 442-446.

Broadbent, D.E., & Aston, B. (1978). Human control of a simulated economic system, Ergonomics, 21, 1035-1043.

Broadbent, D.E., FitzGerald, P., & Broadbent, M.H.P. (1986). Implicit and explicit knowledge in the control of complex systems. British Journal of Psychology, 77, 33-50.

Brodeur, F. (1996). Apport du cervelet dans l'apprentissage implicite d'habiletés visuomotrices et cognitives. Mémoire de maîtrise, Québec: Université Laval.

Brooks, D.N., & Baddeley, A.D. (1976). What can amnesic patients learn? Neuropsychologia, 14, 111-122.

Butters, N., Wolfe, J., Martone, M., Granholm, E., & Cermak, L. S. (1985). Memory disorders associated with Huntington's disease: Verbal recall, verbal recognition and procedural memory. Neuropsychologia, 23, 729-743.

Campbell, J.I.D., & Graham, D.J. (1985). Mental multiplication skill: Structure, process, and acquisition. Canadian Journal of Psychology, 39, 338-366.

Carlson, A.R., Sullivan, A.M., & Schneider, W. (1989). Practice and working memory effects in building procedural skill. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 15, 517-526.

Carraher, T.N., Carraher, D.W., & Schliemann, A.D. (1985). Mathematics in the streets and in the schools. British Journal of Developmental Psychology, 3, 21-29.

Charness, N. (1985). Introduction to the special issue on skill. Canadian Journal of Psychology, 39, 181-187.

Charness, N., & Campbell, J.I.D. (1988). Acquiring skill at mental calculation in adulthood: A task decomposition. Journal of Experimental Psychology: General, 117, 115-129.

Charness, N., Milberg, W., & Alexander, M.P. (1988). Teaching an amnesic a complex cognitive skill. Brain and Cognition, 8, 253-272.

Cheng, P.W. (1985). Restructuring versus automaticity: Alternative accounts of skill acquisition. Psychological Review, 12, 414-423.

Chi, M.T.H., Feltovich, P.J., & Glaser, R. (1981). Categorisation and representation of physics problems by experts and novices. Cognitive Sciences, 5, 121-152.

Cleeremans, A., Destrebecqz, A., & Boyer, M. (1998). Implicit learnig: News from the front. Trends in Cognitive Sciences, 2, 406-416.

Clegg, B.A., DiGirolamo, G.J., & Keel, S.W. (1998). Sequence learning. Trends in Cognitive Sciences, 2, 275-281.

Cohen, A., Ivry, R.I., & Keele, S.W. (1990). Attention and structure in sequence learning. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 16, 17-30.

Cohen, N.J., & Corkin, S. (1981). The amnesic patient H.M.: Learning and retention of a cognitive skill. Society for Neuroscience Abstracts, 7, 235.

Cohen, N.J., & Squire, L.R. (1980). Preserved learning and retention of pattern-analyzing skill in amnesia: Dissociation of knowing how and knowing that. Science, 210, 207-210.

Cohen, N.J., Eichenbaum, H., Deacedo, B.S., & Corkin, S. (1985). Different memory systems underlying acquisition of procedural and declarative knowledge. Ann New York Academy of Science.

Corkin, S. (1965). Tactually guided maze learning in man: Effects of unilateral cortical excisions and bilateral hippocampal lesions. Neuropsychologia, 3, 339-351.

Crossman, E.R.F.W. (1959). A theory of the acquisition of speed-skill. Ergonomics, 2, 153-166.

Danion, J. M., Peretti, S., Grange, D., Bilik, M., Imbs, J.L., & Singer, L. (1992). Effects of chlorpromazine and lorazepam on explicit memory, repetition priming and cognitive skill learning in healthy volunteers. Psychopharmacology, 108, 345-351.

Daum, I., Ackermann, H., Schugens, M.M., Reimold, C., Dichgans, J., & Birbaumer, N. (1993). The cerebellum and cognitive functions in humans. Behavioral Neuroscience, 107, 411-419.

Daum, I., Schugens, M.M., Spieker, S., Poser, U., Schonle, P.W., & Birbaumer, N. (1995). Memory and skill acquisition in Parkinson's disease and frontal lobe dysfunction. Cortex, 31, 413-432.

Daum, I., Spieker, S., & Schugens, M.M. (1992a). Declarative and procedural memory in Parkinson's disease. Movement Disorders, 7, 70-86.

Daum, I., Spieker, S., & Schugens, M.M. (1992b). Declarative and procedural memory in Parkinson's disease. Movement Disorders, 7(Suppl.), 91.

DeGroot, A.D. (1965). Thought and choice in chess. The Hague: Mouton.

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.

Ericsson, K.A. (1985). Memory skill. Canadian Journal of Psychology, 39, 188-231.

Eysenck, M.W., & Keane, M.T. (1993). Cognitive psychology: A student's handbook. Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Fasotti, L., Eling, P.A.T.M., & van Houtem, J. (1994). Categorization of arithmetic word problems by normals, frontal and posterior-injured patients. Journal of Clinical and Experimental Psychology, 16, 723-733.

Fiez, J.A., Petersen, S.E., Cheney, M.K., & Raichle, M.E. (1992). Impaired non motor learning and error detection associated with cerebellar damage: A single case study. Brain, 115, 155-178.

Fitts, P.M. (1964). Perceptual-motor skill learning. In A.W. Melton (Ed.), Categories of human learning. New York: Academic Press.

Fitts, P.M., & Postner, M.I. (1967). Human performance. Belmont, CA: Brooks/Cole.

Gabrieli, J.D.E. (1998). Cognitive neuroscience of human memory. Annual Review of Psychology, 49, 87-115.

Gabrieli, J.D.E., Keane, M.M., & Corkin, S. (1987). Acquisition of problem-solving skills in global amnesia. Society for Neuroscience Abstract, 13, 1455.

Glisky, E.L., & Schacter, D.L. (1988). Long-term retention of computer learning by patients with memory disorders. Neuropsychologia, 26, 173-178.

Glisky, E.L., & Schacter, D.L. (1989). Extending the limits of complex learning in organic amnesia: Computer training in a vocational domain. Neuropsychologia, 27, 107-120.

Glisky, E.L., Schacter, D.L., & Tulving, E. (1986). Computer learning by memory-impaired patients: Acquisition and retention of complex knowledge. Neuropsychologia, 24, 313-328.

Goldberg, T.E., Saint-Cyr, J.A., & Weinberger, D.R. (1990). Assessment of procedural learning and problem solving in schizophrenic. Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neuroscience, 2, 165-173.

Graf, P., Squire, L.R., & Mandler, G. (1984). The information that amnesic patients do not forget. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 10, 164-178.

Grafman, J., Litvan, I., Massaquoi, S., Stewart, M., Srigu, A., & Hallett, M. (1992). Cognitive planning deficit in patients with cerebellar atrophy. Neurology, 42, 1493-1496.

Grafton, S.T., Hazeltine, E., & Ivry, E.E. (1995). Functional mapping of sequence learning in normal humans. Journal of Cognitive Neuroscience, 7, 497-510.

Gras-Vincendon, A., Danion, J. M., Grange, D., Bilik, M., Willard-Schroeder, D., Sichel, J. P., & Singer, L. (1994). Explicit memory, repetition priming and cognitive skill learning in schizophrenia. Schizophrenia Research, 13, 117-126.

Hallett, M., & Grafman, J. (1997). Executive function and motor skill learning. International Review of Neurobiology, 41, 297-323

Hazeltine, E., Grafton, S.T., & Ivry, R. (1997). Attention and stimulus characteristics determine the locus of motor- sequence encoding. A PET study. Brain, 120, 123-140.

Hebb, D.O. (1961). Distinctive features of learning in higher animals. In J.F. Delafresnaye (Ed.), Brain mechanisms and learning. New York: Oxford University Press. pp 37-46.

Heller, J., & Reif, F. (1984). Prescribing effective human problem solving: Problem description in physics. Cognition & Instruction, 2, 191-203.

Heuer, H. (1996). Dual-task performance. In O. Neumann, & A.F. Sanders (Eds.), Handbook of perception and action, Vol 3: Attention (pp. 113-153). London: Academic Press.

Howell, D.C. (1987). Statistical methods for psychology (2nd ed.). Boston: PWS-Kent Publishing Company.

Kim, S.-G., Ugurbil, K., & Strick, P.L. (1994). Activation of a cerebellar output nucleus during cognitive processing. Science, 265, 949-954.

Kirk, R.E. (1982). Experimental design (2nd ed.). Pacific grove, CA: Brooks/Cole Publishing Company

Knowlton, B.J., & Squire, L.R. (1994). The information acquired during artificial grammar learning. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 20, 79-91.

Knowlton, B.J., & Squire, L.R. (1996). Artificial grammar learning depends on implicit acquisition of both abstract and exemplar-specific information. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 22, 169-181.

Knowlton, B.J., Mangels, J.A., & Squire, L.R. (1996). A neostriatal habit learning system in humans. Science, 273, 1399-1402.

Knowlton, B.J., Ramus, S.J., & Squire, L.R. (1992). Intact artificial grammar learning in amnesia: Dissociation of classification learning and explicit memory for specific instances. Psychological Science, 3, 172-179.

Knowlton, B.J., Squire, L.R., & Gluck, M.A. (1994). Probabilistic classification learning in amnesia. Learning and Memory, 1, 106-120.

Knowlton, B.J., Squire, L.R., Paulsen, J.S., Swerdlow, N.R., & Swenson, M. (1996). Dissociations within nondeclarative memory in Huntington's disease. Neuropsychology, 10, 538-548.

Kolers, P. A. (1985). Reading a year later. Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory, 2, 554-565.

Kolers, P.A., & Duchnicky, R.L. (1985). Discontinuity in cognitive skill. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 11, 655-674.

Kyllonen, P.C., & Stephens, D.L. (1990). Cognitive abilities as determinants of success in acquiring logic skill. Learning and Individual Differences, 2, 129-160.

Landa, L.N. (1983). The algo-heuristic theory of instruction. In C.M. Reigeluth (Ed.), Instructional design theories and models (pp. 55-73). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Larkin, J.H. (1985). Understanding problem representations and skill in physics. In S.F. Chipman, J.W. Segal, & R. Glaser (Eds.), Thinking and learning skills: Vol 2. Research and open questions. Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Leiner, H.C., Leiner, A.L., & Dow, R.S. (1986). Does the cerebellum contribute to mental skills?. Behavioral Neuroscience, 100, 443-454.

Leplat, J. (1988). Les habiletés cognitives dans le travail. In P. Mardaga (Ed.), Les automatismes cognitifs (pp.139-172).

Lezak, M. D. (1995). Neuropsychological assessment (3rd ed.). Oxford: Oxford University Press.

Logan, G.D. (1985). Skill and automaticity: Relations, implications, and future directions. Canadian Journal of Psychology, 39, 367-386.

Logan, G.D. (1988). Toward an instance theory of automatization. Psychological Review, 95, 492-527.

Mackay, D.G. (1982). The problem of flexibility, fluency, and speed-accuracy trade-off in skilled behavior. Psychological Review, 89, 483-506.

McGlinchey-Berroth, R., Milberg, W.P., & Charness, N. (1989). Learning of a complex arithmetic skill in dementia: Further evidence for a dissociation between compilation and production. Cortex, 25, 697-705.

Milberg, W., Alexander, M. P., Charness, N., McGlinchey-Berroth, R., & Barrett, A. (1988). Learning of a complex arithmetic skill in amnesia: Evidence for a dissociation between compilation and production. Brain & Cognition, 8, 91-104.

Milner, B. (1970). Memory and the medial temporal regions of the brain. In K.H. Pribram, & D.E. Broadbent (Eds.), Biology of memory. New York: Academic Press.

Milner, B., Corkin, S., & Teuber, H.-L. (1968). Further analysis of the hippocampal amnesic syndrome: 14-year follow-up study of H.M. Neuropsychologia, 6, 215-234.

Mishkin, M., & Appenzeller, T. (1987). L'anatomie de la mémoire. Scientific American, 255, 80-89.

Moscovitch, M., Vriezen, E., & Goshen-Gottstein, Y. (1993). Implicit tests of memory in patients with focal lesions or degenerative brain disorders. In F. Boller and J. Grafman (Eds.). Handbook of Neuropsychology, Vol.8, (pp. 133-173). TOWN: Elsevier Science Publishers.

Newell, A., & Rosenbloom, P.S. (1981). Mechanisms of skill acquisition and the law of practice. In J.R Anderson (Ed), Cognitive skills and their acquisition (pp. 1-55). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers.

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

Owen, A. M., James, M., Leigh, P. N., Summers, B. A., Marsden, C. D., Quinn, N. P., Lange, K. W., & Robbins, T. W. (1992). Fronto-striatal cognitive deficits at different stages of Parkinson's disease. Brain, 115, 1727-1751.

Owen, A.M. (1997). Cognitive planning in humans: Neuropsychological, neuroanatomical and neuropharmacological perspectives. Progress in Neurobiology, 53, 431-450.

Owen, A.M., & Doyon, J. (in press). The cognitive neuropsychology of Parkinson's disease: A functional neuroimaging perspective. To appear in: Parkinson's disease (Advances in Neurology), G. Stern (Ed.).

Owen, A.M., Downes, J.J., Sahakian, B.J., Polkey, C.E., & Robbins, T.W. (1990). Planning and spatial working memory following frontal lobe lesions in man. Neuropsychologia, 28, 1021-1034.

Owen, A.M., Doyon, J., Petrides, M., & Evans, A.C. (1996). Planning and spatial working memory: A positron emission tomography study in humans. European Journal of Neuroscience, 8, 353-364.

Pascual-Leone, A., Grafman, J., Clark, K., Stewart, M., Massaquoi, S., Lou, J.-S., & Hallett, M. (1993). Procedural learning in Parkinson's disease and cerebellar degeneration. Annals of Neurology, 34, 594-602.

Pauli, P., Lutzenberger, W., Rau, H., Birbaumer, N., Rickard, T.C., Yaroush, R.A., & Bourne, L.E.Jr. (1994). Brain potentials during mental arithmetic: Effects of extensive practice and problem difficulty. Cognitive Brain Research, 2, 21-29.

Petri, H.L., & Mishkin, M. (1994). Behaviorism, cognitivism and the neuropsychology of memory. American Scientist, 82, 30-37.

Phillips, A.G., & Carr, G.D. (1987). Cognition and the basal ganglia: A possible substrate for procedural knowledge. Canadian Journal of Neurological Science, 14, 381-385.

Pinel, J.P.J. (1993). Biopsychology (2nd ed.). Boston: Allyn and Bacon.

Pirolli, P.L., & Anderson, J.R. (1985). The role of learning from examples in the acquisition of recursive programming skills. Canadian Journal of Psychology, 39, 240-272.

Rauch, S.L., Savage, C.R., Brown, H.D., Curran, T., Alpert, N.M., Kendrick, A., Fischman, A.J., & Kosslyn, S.M. (1995). A PET investigation of implicit and explicit sequence learning. Human Brain Mapping, 3, 271-286.

Reber, P.J., & Squire, L. (1998). Encapsulation of implicit and explicit memory in sequence learning. Journal of Cognitive Neuroscience, 10, 248-263.

Roncacci, S., Troisi, E., Carlesimo, G. A., Nocentini, U., & Caltagirone, C. (1996). Implicit memory in parkinsonian patients: Evidence for deficient skill learning. European Neurology, 36, 154-159.

Rosenbloom, P., & Newell, A. (1986). The chunking of goal hierarchies: A generalised model of practice. In R.S. Michalski, J.G. Carbonel, & J.M. Mitchel (Eds.), Machine learning II: an artificial intelligence approach. Los Altos, CA: Kaufman.

Rosenbloom, P.S., & Newell, A. (1987). An integrated computational model of stimulus-response compatibility and practice. In Bower, G.H. (Ed) The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory, Vol. 21. (pp. 1-52). San Diego, CA: Academic Press.

Saint-Cyr, J.A., Taylor, A.E., & Lang, A.E. (1988). Procedural learning and neostriatal dysfunction in man. Brain, 111, 941-959.

Saint-Cyr, J.A., & Taylor, A.E. (1992). The mobilization of procedural learning: The “key signature” of the basal ganglia. In L.R. Squire, & N. Butters (Eds.) Neuropsychology of memory (pp. 188- 202). New York: The Guildford Press.

Schacter, D.L. (1985). Priming of old and new knowledge in amnesic patients and normal subjects. Ann New York Academy of Science, 444, 41-53

Schacter, D.L. (1987). Implicit memory: History and current status. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 13, 501-518.

Schacter, D.L. (1990). Memory. In M.I. Posner (Ed.), Foundations of cognitive science (pp.683-725). Cambridge: MIT Press.

Schacter, D.L. (1994). Implicit knowledge: New perspectives on unconscious processes. International Review of Neurobiology, 37, 271-288.

Schacter, D.L., Peter Chiu, C.-Y., & Ochsner, K.N. (1993). Implicit memory: A selective review. Annual Review of Neurosciences, 16, 159-182.

Schmahmann, J.D. (1997). From movement to thought. In The cerebellar contribution to cognitive processing.

Schmand, B., Brand, N., & Kuipers, T. (1992). Procedural learning of cognitive and motor skills in psychotic patients. Schizophrenia Research, 8, 157-170.

Schmidtke, K., Handschu, R., & Vollmer, H. (1996). Cognitive procedural learning in amnesia. Brain & Cognition, 32, 441-467.

Schneider, W., & Shiffrin, R.M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search and attention. Psychological Review, 84, 1-66.

Schwartz, M., & Bryden, M.P. (1971). Coding factors in the learning of repeated digit sequences. Journal of Experimental Psychology, 87, 331-334.

Scoville, W.B., & Milner, B. (1957). Loss of recent memory after bilateral hippocampal lesions. Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry, 20, 11-21.

Shallice, T. (1982). Specific impairments of planning. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B298, 199-209.

Shiffrin, R.M., & Dumais, J.T. (1981). The development of automatization. In J.R. Anderson (Ed.), Cognitive skill and their acquisition (pp. 111-139). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Shiffrin, R.M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending, and a general theory. Psychological Review, 84, 127-190.

Squire, L. R., & Zola-Morgan, M. (1990). Cognitive skill learning in amnesia. Psychobiology, 18, 109-117.

Squire, L.R. (1992). Declarative and nondeclarative memory: Multiple brain systems supporting learning and memory. Journal of Cognitive Neuroscience, 3, 232-243.

Squire, L.R., & Zola, S.M. (1996). Structure and function of declarative and nondeclarative memory systems. Proceedings of the National Academy of Science USA, 93, 13515-13522.

Squire, L.R., & Zola-Morgan, S., (1991). The medial temporal lobe memory system. Science, 253, 1380-1386.

Squire, L.R., Knowlton, B., & Musen, G. (1993). The structure and organisation of memory. Annual Review of Psychology, 44, 453-495.

Strayer, D.L., & Kramer, A.F. (1994). Aging and skill acquisition: Learning-performance distinctions. Psychological Aging, 9, 589-605.

Vakil, E., & Agmon-Ashkenazi, D. (1997). Baseline performance and learning rate of procedural and declarative memory tasks: Younger versus older adults. Journal of Gerontol. B. Psychol. Sci. Soc., 52, 229-234.

Vanier, M. (1991). Test de la Tour de Londres: Évaluation de la capacité de panification. Document de travail (version 2.0). Institut de réadaptation de Montréal, École de réadaptation de l'Université de Montréal.

Wechsler, D. (1987). Wechsler Memory Scale-Revised. Psychological Corporation: New York.

Willingham, D.B. (1998). A neuropsychological theory of motor skill learning. Psychological Review, 105, 558-584.

Willingham, D.B., Bullemer, P., & Nissen, M.J. (1989). On the development of procedural knowledge. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 15, 1047-1060.

Wise, S.P. (1996). The role of the basal ganglia in procedural memory. Seminars in the Neurosciences, 8, 39-46.

Woltz, D.J. (1988). An investigation of the role of working memory in procedural skill acquisition. Journal of Experimental Psychology: General, 117, 319-331.

Yap, R.L., & van der Leij, A. (1994). Testing the automatization deficit hypothesis of dyslexia via a dual-task paradigm. Journal of Learning Disabilities, 27, 660-665.