

THÈSE

Pour l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE POITIERS
Faculté des sciences du sport
Centre de recherches sur la cognition et l'apprentissage (Poitiers)
(Diplôme National - Arrêté du 7 août 2006)

École doctorale : Cognition, comportements, langage(s) - CCL
Secteur de recherche : Sciences et techniques des activités physiques et sportives

Présentée par :
André Caissié

Étude des transferts intermodaux lors de tâches de rotation mentale : spécificité tactile, indépendance sensorielle ou dépendance visuelle ?

Directeur(s) de Thèse :
Lucette Toussaint

Soutenue le 15 novembre 2012 devant le jury

Jury :

Président	Bernard Thon	Professeur d'Université, Université de Toulouse III
Rapporteur	Aymeric Guillot	Maître de Conférences-HDR, Université de Lyon I
Rapporteur	Michel-Ange Amorim	Professeur d'Université, Université Paris-Sud 11
Membre	Lucette Toussaint	Maître de Conférences, Université de Poitiers
Membre	Yannick Blandin	Professeur d'Université, Université de Poitiers

Pour citer cette thèse :

André Caissié. *Étude des transferts intermodaux lors de tâches de rotation mentale : spécificité tactile, indépendance sensorielle ou dépendance visuelle ?* [En ligne]. Thèse Sciences et techniques des activités physiques et sportives. Poitiers : Université de Poitiers, 2012. Disponible sur Internet <<http://theses.univ-poitiers.fr>>

UNIVERSITE DE POITIERS

U. F. R. STAPS

Centre de Recherches sur la Cognition et l'Apprentissage
CNRS – UMR 7295

THESE

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE POITIERS

SPECIALITE : SCIENCES ET TECHNIQUES DES ACTIVITES PHYSIQUES ET SPORTIVES

Présentée par

André F. CAISSIE

**ETUDE DES TRANSFERTS INTERMODAUX LORS
DE TACHES DE ROTATION MENTALE**

Spécificité tactile, indépendance sensorielle ou dépendance visuelle ?

Sous la direction
de Yannick BLANDIN et de Lucette TOUSSAINT

Membres du jury :

Michel-Ange AMORIM	<i>Professeur d'Université, Université Paris-Sud 11</i>	Rapporteur
Yannick BLANDIN	<i>Professeur d'Université, Université de Poitiers</i>	Directeur
Aymeric GUILLOT	Maître de Conférences-HDR, Université de Lyon I	Rapporteur
Bernard THON	<i>Professeur d'Université, Université de Toulouse III</i>	Examineur
Lucette TOUSSAINT	Maître de Conférences, Université de Poitiers	Directeur

Soutenue le 15 novembre 2012

Remerciements

Le travail sur lequel repose cette thèse a été dirigé par Lucette Toussaint et Yannick Blandin, à qui je dois les plus sincères remerciements. Leurs efforts, leurs conseils, leurs enseignements, leurs critiques, et leur patience, durant ces années de thèse, ont été d'une grande aide, à la fois humaine et professionnelle. En tant que directeurs, ils m'ont permis de voir, de comprendre, et finalement de toucher l'essence même de l'activité de recherche en psychologie expérimentale. En tant que collègues, ils m'ont intégré dans une équipe sérieuse, dans la poursuite de connaissances, dans un cadre de travail idéal pour la réflexion, la discussion et l'échange d'idées. Si le transfert international n'a pas toujours été facile, je dois tout mon respect aux membres de l'équipe ATCO, du laboratoire CeRCA, et de la Maison des Sciences de l'Homme et de la Société. Vous m'avez accueilli, écouté et soutenu lors de mon passage à Poitiers. Je souhaite aussi remercier tous les doctorants, pour le partage et la compréhension. Enfin, un grand merci est dû aux membres du département de psychologie, et aux étudiants. Tous, vous aurez contribué à mes succès, en rendant cette expérience professionnelle des plus mémorables.

Je tiens tout spécialement à remercier mes amis, d'ici et d'ailleurs, ayant participé de loin ou de près à mes efforts pendant ces années. Si ce n'était que par de simples échanges, autour d'une table, dans une soirée, lors d'une promenade, ceux-ci résonnent encore dans mes souvenirs. Je me souviendrai toujours de la rue du Coq hardi, de la route de Ligugé, de la rue de l'Arceau, de la rue Beausoleil, de la place du Calvaire, de la rue Girouard, de la rue de la Tranchée, de la Varenne, de la rue Carnot, du marché Notre-Dame : pour les lieux, mais aussi pour les personnes qui ont occupé mon chemin, le temps d'habiter, d'apprécier la lenteur, la musique, les arts, et le temps. A Fanny, merci pour ta présence d'esprit, pour ta générosité et ton attention : tu as écouté mes inspirations et j'en resterai toujours reconnaissant. Mon travail aurait été très difficile sans les précieux encouragements de ma famille, de mes frères, et de mes amis de l'Acadie. Certes, il en est allé d'une déchirure, le temps d'un départ, d'une absence, durant ces dernières années en Europe. Malgré cela, votre compréhension n'a cessé de me surprendre. Surtout, merci à mes parents : vous avez été forts présents malgré la distance.

Je dois aussi un grand merci, à M. Janczyk, M. Künde et leur équipe de m'avoir accueilli en Allemagne, à M. Vigneau du Canada pour l'échange et les collaborations.

Je remercie enfin Messieurs les rapporteurs et Membres du jury pour l'examen de ce travail de thèse.

– TABLE DES MATIERES –

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS	4
PREMIERE PARTIE : CADRE THEORIQUE	
1. Imagerie mentale, transferts intermodaux et rotation mentale	8
1.1. Imagerie mentale et représentations	8
1.2. <i>Exemple d'une tâche</i> en images « J » et « D ».....	9
1.3. Théorie imagée et théorie propositionnelle : tâche « J » et « D ».....	10
1.4. <i>L'image visuelle</i> : problèmes de généralisation aux autres modalités sensorielles ..	13
1.5. Format des représentations chez les aveugles précoces et les sujets voyants	14
1.6. Transferts intermodaux et similarités dans le traitement	15
1.7. <i>Rotation mentale d'objets</i>	18
1.8. Spécificité des références spatiales visuelles et tactiles en rotation mentale	21
1.9. Résumé	22
2. Modalités sensorielles et reconnaissance d'objets	23
2.1. Perception cutanée et perception haptique	23
2.2. Procédures exploratoires tactiles	24
2.3. Vision passive et vision active	25
2.4. La modalité visuelle : fixations, saccades et patrons de mouvements oculaires	26
2.5. Comparaison des modalités sensorielles : similarités et différences.....	27
2.6. <i>Catégorisation visuelle et tactile d'objets ou traits d'objets</i>	28
2.7. <i>Reconnaissance d'objets familiers et de formes géométriques</i>	29
3. Modalités sensorielles et organisation multi-sensorielle du cerveau	31
3.1. Représentations de formes géométriques, images et zones bimodales	31
3.2. <i>Priming ou influence de l'expérience sensorielle sur les zones activées</i>	33
3.3. Activation du cortex visuel dans <i>une tâche d'orientation spatiale tactile</i>	34
3.4. Activation du cortex visuel en rotation mentale tactile.....	36
3.5. Résumé (sections 2 et 3)	37
4. Tâches de rotation mentale et problématique	38
4.1. Présentation du Test des Rotations Mentales (Vandenberg & Kuse, 1978)	38
4.2. <i>Caractéristiques d'items et modèles de difficulté du MRT</i>	39
4.3. Transferts intermodaux au MRT	42
4.4. Rotation mentale, pente, intercept, et différences stratégiques	43

DEUXIEME PARTIE : PARTIE EXPERIMENTALE

ETUDE 1 : Etude des transferts intermodaux lors de tâches de rotation mentale. Spécificité tactile, indépendance sensorielle ou dépendance visuelle ?

1.1. Introduction générale (Expériences 1 et 2).....	46
1.2. Expérience 1a. Les aptitudes spatiales mesurées par le Test des Rotations Mentales dépendent-elles d'une expérience sensorielle spécifique ?	48
1.2.1 Méthode	49
1.2.2. Résultats	57
1.2.3. Discussion	60
1.3. Expérience 1b. Comparaison des qualités psychométriques visuelles et tactiles du Test des Rotations Mentales	64
1.3.1. Méthode.....	65
1.3.2. Résultats	67
1.3.3. Discussion	73
1.4. Expérience 1c. Effet modulateur de la difficulté sur les transferts intermodaux au Test des Rotations Mentales	76
1.4.1. Méthode.....	77
1.4.2. Résultats	79
1.4.3. Discussion	85
1.5. Conclusion de l'Expérience 1	88
2.1. Expérience 2a. La rotation mentale tactile et visuelle dépend elle d'une expérience sensorielle spécifique ?	90
2.1.1. Méthode.....	91
2.1.2. Résultats	99
2.1.3. Discussion	107
2.2. Expérience 2b. L'expérience tactile influence-t-elle la rotation mentale visuelle ? Etude des stratégies liées à la prise des informations spatiales.....	110
2.2.1. Méthode	111
2.2.2. Résultats	114
2.2.3. Discussion	118
2.3. Conclusion de l'Expérience 2	121
Etude 1 : Discussion générale	123

ETUDE 2 : L'effet du changement de tâches de rotation mentale en fonction de l'âge : la résolution d'une tâche d'imagerie visuelle et d'imagerie motrice dépend elle de représentations et de stratégies spécifiques ?

3.1. Remarques préliminaires	128
3.2. Introduction générale et contexte	128
3.2.1. Imagerie visuelle versus imagerie motrice	128
3.2.2. Etudes concernant l'échange des stratégies visuelle et motrice	131
3.2.3. Résumé et objectifs.....	133
3.2.4. Les effets du vieillissement sur l'imagerie mentale	133
3.2.5. Etudes sur l'immobilisation et les capacités d'imagerie mentale	135
3.2.6. Objectifs et quelques prédictions concernant l'effet du changement	136
3.3. Présentation de l'étude 2	137
3.3.1. Méthode.....	138
3.3.2. Résultats	143

3.3.3. Discussion	148
TROISIEME PARTIE : DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES	153
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	171
INDEX DES FIGURES	210
INDEX DES TABLEAUX	217
RESUME	219
ABSTRACT	220
ANNEXES	221

– AVANT-PROPOS –

Avant-propos

Aristote considérait le toucher comme un sens multiple, permettant d'atteindre divers objectifs (Aristote, 384-322, BC, *De Anima*). Si nous avons longtemps observé l'importance du toucher pour la manipulation d'objets, nous commençons seulement à mieux comprendre son rôle pour la perception spatiale humaine. Certains chercheurs considèrent qu'aucune autre modalité sensorielle n'a autant de propriétés et de mystères à clarifier (Grunwald, 2008). Elle permettrait l'étude de la pensée, de l'action et de la conscience.

La perception tactile enrichit notre sens de la réalité : on doit la considérer de même importance que la perception visuelle. Entre autre, elle contribue à la construction de notre schéma corporel (Wallon, 1956) et à l'intellectualisation de notre environnement physique. L'importance qu'on lui accorde se démontre dans différentes orientations de recherche. Des chercheurs s'intéressent aux interactions Homme-machine (Iwata, 2008). Des applications de recherche permettent aux personnes malvoyantes des vies plus autonomes (Heller, 2000 ; Heller & Ballesteros, 2006). Des études ont aussi démontré de fortes relations entre des tâches tactiles et des tests d'intelligence spatiaux-visuels (Carroll, 1993 ; Stankov, Seijova-Cajić, & Roberts, 2001).

S'il est vrai que le toucher bénéficie d'une attention grandissante, la majorité des recherches sur les aptitudes spatiales a concerné la modalité visuelle jugée dominante (Millar, 1975, 1994 ; Millar & Al-Attar, 2002 ; Rock & Victor, 1964 ; Thinus-Blanc & Gaunet, 1997). Les scientifiques ont ainsi accordé une plus grande attention au système visuel pour l'étude de la pensée et du fonctionnement de la perception humaine. En l'occurrence, les études en laboratoire ont permis de développer plusieurs modèles théoriques du traitement interne visuel (i.e., gestion cognitive de l'information visuelle).

La théorie de l'image (Kosslyn, Thompson, & Ganis, 2006) suggère notamment un traitement interne imagé, en l'absence de la présence physique de l'objet. L'image d'un objet serait le reflet interne des étapes initiales de la perception antérieure. Lorsque nous pensons de façon soutenue à un objet (i.e., notre vélo), nous avons l'impression de le voir. Par ailleurs, la question des représentations suscite de vives discussions. Il serait difficile, encore aujourd'hui, d'obtenir un consensus concernant leur nature et leur format exacts.

Dans cette thèse, nous voulons définir les similarités entre représentations découlant d'une exploration visuelle et les représentations découlant d'une exploration

tactile, lors de tâches d'imagerie mentale. Les tâches d'imagerie mentale nécessitent l'utilisation de représentations mentales. Elles comprennent, entre autre, des tâches élémentaires de rotation mentale (i.e., Shepard & Metzler, 1971) et des tâches d'aptitudes spatiales dérivées (i.e., Test des Rotations Mentales ; Vandenberg & Kuse, 1978). La rotation mentale se définit comme la capacité à manipuler mentalement la représentation d'un objet ou à faire tourner mentalement une image d'un objet.

Typiquement, dans une tâche élémentaire de rotation mentale, deux objets sont présentés et les participants doivent décider le plus rapidement possible si ces deux objets sont identiques ou différents. Plus les disparités angulaires de positionnement entre deux objets identiques augmentent, plus la rotation mentale serait nécessaire pour attester ou non de leur similitude. La rotation mentale aurait aussi été démontrée lors du traitement tactile (Prather & Sathian, 2002). On suggère ainsi l'existence de processus similaires quelle que soit la modalité sensorielle. Il est alors possible que les participants dans différentes conditions sensorielles puissent créer et manipuler des images (i.e., faire tourner l'image pour ramener un des objets désorientés en position de comparaison efficace).

Le toucher serait « redondant avec la vision pour l'accès à la connaissance spatiale de l'environnement et des propriétés d'objets » (Hatwell, 2000a, p. 1). La main enveloppe très rapidement les objets et permet leur reconnaissance, nécessitant toutefois plus de temps. Elle permettrait d'acquérir l'information nécessaire au développement de représentations unifiées d'objets et de leurs formes. Nous pourrions penser que le système tactile traite les mêmes caractéristiques d'objets que le système visuel, pour la formation de représentations similaires. Or, la question n'est pas si simple. Les deux modalités diffèrent selon plusieurs aspects. Par exemple, la modalité tactile est spécialisée pour le traitement des éléments micro-géométriques (i.e., textures), surpassant la vue pour les textures fines. La vue acquiert rapidement l'information sur la forme globale des objets, alors que le traitement tactile de formes est plutôt séquentiel. Les deux modalités sensorielles permettent des modes différents d'encodage de l'information. En revanche, les aires visuelles impliquées dans le traitement visuel seraient activées durant le traitement de formes géométriques tactiles et des tâches de rotation mentale tactile. Des recherches neurophysiologiques récentes auraient ainsi suggéré une dépendance visuelle pour la discrimination de formes géométriques et la rotation mentale par le toucher (Prather, Votaw, & Sathian, 2004; Rösler, Röder, Heil, Hennighausen, 1993 ; Sathian, 2005). D'autres chercheurs ont démontré deux types d'imagerie mentale : l'imagerie spatiale vs. l'imagerie visuelle (Farah, Hammond, Levine, & Calvino, 1988 ; Kozhevnikov, Kosslyn,

& Shephard, 2005). La rotation mentale tactile pourrait ainsi dépendre de coordonnées spatiales (i.e., coordonnées d'objets ; haut-bas, droite-gauche, etc.) ce qui correspond notamment à l'interprétation des processus de rotation mentale observés chez des participants aveugles (Carpenter & Eisenberg, 1978 ; Marmor & Zaback, 1976). Ces recherches soulèvent plusieurs questions concernant des sujets voyants. Entre autre, le traitement de l'information dans des tâches d'imagerie mentale dépend-il d'un traitement visuel ? Le traitement tactile est-il facilité par des représentations visuelles stockées en mémoire ? Comment l'expérience visuelle influence-t-elle le toucher ? L'expérience tactile influence-t-elle l'exploration visuelle ?

Pour répondre à ces questions, nous avons développé deux répliques tactiles de tâches visuelles de rotation mentale. Dans chacune de nos expériences, des participants ont effectué deux tâches consécutives, avec changement de modalité (visuelle – tactile ou tactile – visuelle) ou sans changement (visuel – visuel ou tactile – tactile). Nous avons entre autre évalué l'hypothèse des descriptions structurales. Selon cette hypothèse, la vue et le toucher permettent un traitement et des représentations similaires des caractéristiques structurales d'objets (Ballesteros, Reales, & Manga, 1999 ; James, James, Humphrey, & Goodale, 2006). En plaçant des participants dans deux tâches consécutives, tout en variant les contextes sensoriels de tâche, nous avons évalué les effets d'une première expérience visuelle sur le traitement tactile, et vice versa. Selon le paradigme de transferts intermodaux, l'information traitée par une modalité sensorielle serait transférée, sous forme de code commun, pouvant être utilisée par une modalité sensorielle différente. Ainsi une expérience sensorielle spécifique peut contribuer à améliorer le traitement des informations spatiales. Des études ont déjà privilégié des protocoles expérimentaux de transferts basés sur la reconnaissance intermodale d'objets (James et al., 2006 ; Reales & Ballesteros, 1999). Indépendamment de la modalité sensorielle utilisée lors d'une expérience préalable au pré-test, les participants parvenaient à mieux reconnaître les objets déjà étudiés en phase de transfert. Ainsi, le codage en mémoire visuelle et tactile serait considéré très similaire, occasionnant des transferts explicites (objets familiers) et implicites (objets non familiers) d'informations (Easton, Greene, & Srinivas, 1997a ; Easton, Srinivas, & Greene, 1997b ; Srinivas, Greene, & Easton, 1997).

A notre connaissance, aucune étude n'a évalué à ce jour les transferts intermodaux dans des tâches de rotation mentale. Or, la répétition de tâches de rotation mentale visuelles occasionne un apprentissage implicite (Heil, Rösler, Link, & Bajric, 1998). Dans ce contexte, il ne suffit pas seulement de reconnaître les objets, mais aussi de manipuler

des représentations similaires, pour qu'un transfert se réalise. Le paradigme de transfert intermodal permettrait d'évaluer les similarités ou les différences des traitements visuels et tactiles en rotation mentale. Les protocoles expérimentaux de cette thèse permettent de comprendre la nature des représentations tactiles pour la rotation mentale. En effet, une méconnaissance des processus qui sous-tendent les effets des modalités sensorielles et les capacités d'imagerie mentale justifie le présent travail.

Le plan général de ce manuscrit s'articule autour de trois parties. La première est consacrée à une revue de littérature synthétisant les points de vue sur la nature des représentations mentales et du traitement des informations visuelles et tactiles. Dans la section 1, des théories explicatives de l'imagerie mentale seront abordées. Nous démontrerons que les représentations mentales ne dépendent pas nécessairement d'une modalité sensorielle spécifique. Nous montrerons l'importance d'utiliser le paradigme de transferts intermodaux pour évaluer les similarités et différences du point de vue de la rotation mentale visuelle et de la rotation mentale tactile. Dans les sections 2 et 3, nous présenterons les facteurs explicatifs des similarités/dissimilarités entre modalités sensorielles pour le traitement des informations visuelles et tactiles. Dans la section 4, nous présenterons notre problématique générale.

La recherche expérimentale est illustrée dans la deuxième partie qui comporte 3 expériences principales. Dans la première section expérimentale, les expériences 1a, 1b, et 1c, évaluent le traitement visuel et tactile au Test des Rotations Mentales. Une attention particulière est dédiée aux transferts entre modalités sensorielles, ainsi qu'à l'étude des qualités psychométriques des tests et des modèles de performances. Dans la deuxième section, les expériences 2a et 2b évaluent le traitement visuel et tactile à une tâche de rotation mentale. Nous pourrions évaluer les similarités/dissimilarités représentationnelles visuelles et tactiles, ainsi que leurs similarités/dissimilarités du point de vue des patrons d'inspections, et des transferts intermodaux. Dans la troisième section, nous présenterons une étude du vieillissement normal et des transferts inter-tâches en utilisant des tâches d'imagerie motrice et d'imagerie visuelle.

Enfin, la troisième partie comprenant la discussion générale et les conclusions s'achèvera par la présentation des perspectives de recherches.

– PREMIERE PARTIE –

CADRE THEORIQUE

1. Imagerie mentale, transferts intermodaux et rotation mentale

1.1. Imagerie mentale et représentations

L'imagerie mentale permettrait de générer et de traiter les représentations d'une réalité externe, sous forme de modèles internes (Gallina, 2006). Selon la théorie imagée (quasi-picturale/quasi-perceptuelle ; Kosslyn, Thompson, & Ganis, 2006), les représentations seraient disponibles et récupérées suite à la perception objective de l'environnement (i.e., d'un paysage). Les images préserveraient les propriétés qualitatives, métriques et spatiales des perceptions objectives (Kosslyn, 1973 ; Kosslyn, Ball, & Reiser, 1978). Elles découleraient d'une capacité de haut niveau permettant un traitement des informations sous forme picturale. Ainsi, elles seraient parfois évoquées de façon volontaire, tel un processus descendant ou stratégique. Elles seraient dans d'autres situations utilisées plus automatiquement, une étape dans la résolution d'analogies spatiales (Borst, Kievit, Thompson, & Kosslyn, 2011).

Nos images seraient parfois très vives, et d'autres fois moins vives. Elles conserveraient un caractère très personnel. Nous pourrions ainsi transformer nos images, les faire tourner, les agrandir, les inspecter en détail, etc. L'idée ancienne d'une analogie presque parfaite entre les processus imagés (introspection) et les processus perceptifs (voir Perky, 1910 ; Farah & Smith, 1983 ; sauf voir Segal & Fusella, 1971) aurait trouvé un soutien, entre autre, dans des études comportementales (rotation mentale, i.e., Shepard & Metzler, 1971) et neurophysiologiques (imagerie visuelle et activation du cortex occipital/zones visuelles associatives, i.e., Roland & Gulyas, 1994, Zhang, Weisser, Stilla, Prather, & Sathian, 2004, pour une revue voir Farah, 1988 ; Finke & Shepard, 1986 ; Kosslyn, 1994 ; Kosslyn et al., 2006 ; Tippet, 1992, sauf voir Abell & Currie, 1999).

Toutefois, l'idée d'une perception interne en images, analogues à la perception réelle, continue d'attirer un certain scepticisme (Dennett, 2002 ; Pylyshyn, 2003a, 2003b ; Skinner, 1974 ; voir aussi Sartre, 1940). Par exemple, l'imagerie visuelle interfère avec la vision (i.e., Craver-Lemley & Arterberry, 2001 ; Craver-Lemley & Reeves, 1992). Lorsqu'un participant maintient volontairement une image à l'esprit, celle-ci peut empêcher une analyse visuelle adéquate. S'il est vrai que l'image est organisée topographiquement (i.e., rétino-topie des zones visuelles du cerveau ; voir Tootell et al., 1998 ; sauf voir Abell & Currie, 1999), certains chercheurs considèrent que son rôle dans le traitement

de l'information, au sens plus large, est encore mal défini (Dennett, 2002). Le raisonnement humain ne dépendrait pas nécessairement de la production et de la manipulation d'images lors de tâches spatiales.

Bien que le débat persiste quant au format des représentations internes, certains chercheurs s'entendent sur leur utilité, sous une forme ou une autre. L'imagerie mentale participerait aux processus impliqués dans l'apprentissage, la mémoire, et la pensée (Paivio, 1969). Elle jouerait aussi un rôle dans la motivation (McMahon, 1973), l'apprentissage moteur (Robin, Dominique, Toussaint, Blandin, Guillot, & Le Her, 2007 ; Toussaint & Blandin, 2010 ; Toussaint, Robin, & Blandin, 2010), l'entraînement sportif (Murphy, 1990 ; Paivio, 1985), les aptitudes spatiales (Cohen, et al., 1996 ; Shepard, 1978 ; Shepard & Metzler, 1971), la créativité et la création artistique (Thomas, 1999). Dans le cadre d'un apprentissage, nous pouvons nous représenter une coupe du cerveau et situer les différentes zones anatomiques. Nous pouvons aussi nous représenter un souvenir vif de notre maison d'enfance, marcher dans ses pièces, longer ses fenêtres, « visualiser » la cour extérieure, etc. Un gymnaste peut aussi pratiquer mentalement des mouvements précis avant une compétition.

1.2. Exemple d'une tâche en images « J » et « D »

L'exemple suivant montre l'importance de l'imagerie mentale lors d'une tâche cognitive. L'association (fortuite) de deux informations (i.e., le « J » et le « D ») démontre aussi l'importance de l'usage des représentations mentales pour la formation de concept et la découverte mentale (Homa, Kahol, Tripathi, Bratton, Panchanathan, & Setherman, 2009 ; Logie & Helstrup, 1999 ; Millar, 2000 ; Pearson, Logie, & Gilhooly, 1999 ; Shepard & Cooper, 1982). Nous résumerons brièvement, à la section 1.3., deux interprétations pouvant être offertes, selon deux courants théoriques : la théorie imagée (Kosslyn, 1973 ; 1994 ; Kosslyn et al., 2006), et la théorie propositionnelle (Pylyshyn, 1973 ; 1981 ; 2003a).

Exemple. **1.** Dans une tâche nous vous demandons d'imaginer la lettre « J » (Figure 1a, p. 10). Imaginez bien la lettre en position habituelle. Ensuite, effectuez une transformation de l'orientation de la lettre en l'imaginant à « l'envers » (Figure 1b). Imaginez bien la lettre à « l'envers ». Ensuite, faites tourner la lettre dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, pour la ramener en position habituelle. Vous pouvez imaginer le « J » en mouvement avant de l'immobiliser en position habituelle (Figure 1c). **2.** Maintenant,

introduisez une autre lettre, cette fois un « D » majuscule. Imaginez le « D » collé sur le haut du « J », à la verticale. Vous pouvez imaginer les deux lettres collées, l'une au dessus de l'autre, pendant un instant. Ensuite, faites tourner le « D » de 90° dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. Le « D » tourné est centré et collé sur le haut du « J ». Prenez le temps de bien imaginer le « D » tourné sur le « J ». **3.** Vous remarquez peut-être que l'association des lettres créer une nouvelle forme (Figure 1d). Quelle est cette forme ?

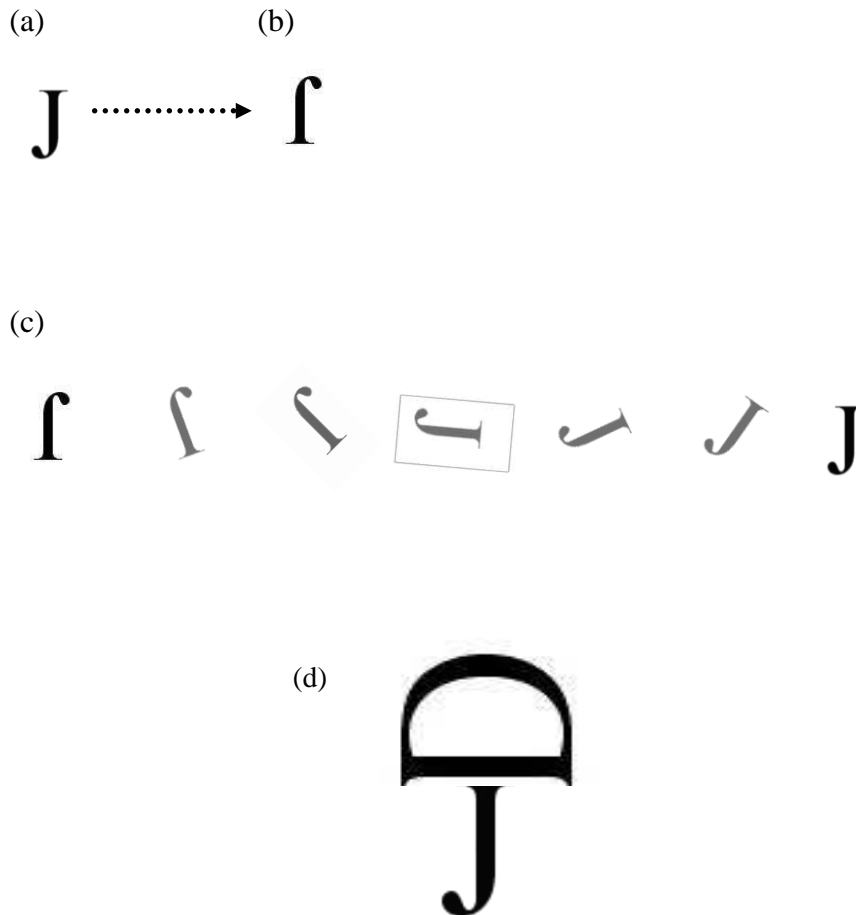


Figure 1. Représentation interne de la lettre « J » (a), renversement de la lettre « J » (b), et rotation antihoraire vers la position usuelle, en fin de parcours mental (c). Représentations « D » et « J » associées en une image mentale unifiée d'un « parapluie » (d) (inspiré du travail par Barquero & Logie, 1999 ; Pearson et al., 1999).

1.3. Théorie imagée et théorie propositionnelle : tâche « J » et « D »

Théorie imagée (quasi-picturale). La tâche des lettres et du parapluie nécessite la création et la manipulation d'images mentales. Les participants ont l'impression dans cette tâche de percevoir les lettres, en l'absence de stimuli visuels. Ils manipulent des représentations imagées connues pour obtenir une image unifiée d'un « nouvel » objet (i.e.,

parapluie). Plus ils prennent de temps pour générer les images et plus elles leur apparaissent nettes (Kosslyn, 1994). Les participants ressentent davantage de difficultés à associer deux lettres distinctes dans une même image mentale. En général, lorsque les images mentales sont constituées de plusieurs parties, elles sont plus difficiles à générer (Kosslyn, 1994). Les participants perçoivent une représentation interne d'un parapluie, constituée de façon analogue à la perception objective du parapluie. Si les participants inspectent une partie de l'image, les autres deviennent moins nettes (Kosslyn, 1994 ; i.e., vision fovéale vs. périphérique). Ils doivent imaginer de façon séquentielle pour associer toutes les parties de la représentation (i.e., manche, toile) dans une image complète du parapluie (Kosslyn, 1980 ; i.e., fixations vs. saccades). Selon Kosslyn et collaborateurs (2006) :

« ... a mental image occurs when a representation of the type created during the initial phases of perception is present but the stimulus is not actually being perceived; such representations preserve the perceptible properties of the stimulus and ultimately give rise to the subjective experience of perception. As this characterizing makes clear, we are not limiting mental imagery to the visual modality. Although visual imagery is accompanied by the experience of “seeing with the mind’s eye,” auditory mental imagery is accompanied by the experience of “hearing with the mind’s ear,” and tactile imagery is accompanied by the experience of “feeling with the mind’s skin,” and so forth. Unlike afterimages, the modality-specific representations that underlie mental imagery are relatively prolonged and can be called up voluntarily. » (p. 4)

L'image finale du parapluie reflète l'activité des processus de traitement pouvant « opérer de l'intérieur ». Ces processus contribuent à l'association des éléments d'informations distincts de l'image (i.e., parapluie). Suite à la lecture des consignes, les participants perçoivent brièvement la forme des stimuli, qu'ils ont ensuite retransmise sous forme d'image. Dans l'exemple, chacun des éléments constitutifs du parapluie ont été codés de façon préalable en unités perceptuelles, visuelles. La nature du code dépend préférentiellement de la modalité sensorielle avec laquelle les participants perçoivent habituellement les lettres et le parapluie.

Théorie propositionnelle (descriptive). Selon une perspective plus descriptive, les participants résolvent la tâche des lettres et du parapluie en réorganisant leurs connaissances tacites (i.e., sur les stimuli décrits dans les consignes ; sur les coordonnées spatiales et sur la rotation antihoraire en degrés). L'information serait traitée et interprétée sous forme de représentations verbales et symboliques (i.e., lettres, orientations,

association, et forme finale). Les symboles appartiennent à des classes de formes (« J » et « D » : lettres) sur lesquelles on effectue des mises en relation, à chaque étape de la tâche (i.e., le « D » est sur le « J » ; le « D » est couché sur le « J »). Les symboles ne seraient donc pas des images. Les symboles seraient traités par des processus cognitifs, et influencés par les croyances préalables et les attentes du sujet (Pylyshyn, 1984, Pylyshyn, 2003b). Ainsi, la compréhension et l'interprétation des consignes auraient été plus importantes pour représenter le parapluie. Il n'y a pas d'analogie mentale à la perception objective, et le sens de l'énigme et des symboles peut être déchiffré en termes symboliques plus abstraits. Selon Pylyshyn (2003a) :

« ... there is no pictorial object, no stable, spatially distributed, topographically organized representation that we would call a picture, at least not by the time the visual information becomes available to our cognitive mind. » (p. xiii)

Le jeu d'association des symboles donnerait certes l'impression d'une forme imaginée, mais elle serait créée sur la base des propositions et des connaissances. L'image serait une impression subjective ne pouvant pas préserver la structure analogue à la perception antérieure. L'information serait plutôt traitée en représentations uniques et indépendantes de la modalité sensorielle d'origine. Dans cet exemple, il est peu probable que des images isomorphes des lettres aient été traitées, manipulées, et associées. L'interprétation du lecteur ou du participant durant la tâche est plus importante pour accéder à la représentation finale du parapluie.

Bien que les deux approches théoriques concernant les représentations et le raisonnement spatial puissent diverger, sur des points de contenu (pictural vs. symbolique/propositionnel), une trace ou un semblant de perception interne donne l'impression de « voir » les lettres et l'association « saute aux yeux » par l'effort interne de raisonnement. Il est possible qu'on ait pu avoir l'impression subjective de voir. Toutefois il est également possible que le résultat final ait été affecté par la compréhension des consignes, du sens des lettres, pour la formation d'une représentation plus ou moins squelettique d'un objet connu : le parapluie. La position indéterministe (Anderson, 1978 ; Anderson, 1979 ; Anderson & Bower, 1973) se situe en position intermédiaire aux deux propositions précédentes, en reconnaissant un certain rôle des représentations picturales, et à la fois des symboles en codage unique, dérivés des connaissances tacites du participant. Dans l'exemple du parapluie, différents cheminements dans le raisonnement peuvent aussi

permettre d'accéder à la représentation finale. Le fait que certaines personnes ne parviennent pas à la représentation finale correcte peut laisser supposer une certaine difficulté à associer deux composantes distinctes, à manipuler l'image, ou même comprendre les consignes. Selon Pearson et collaborateurs (1999), la manipulation des représentations lors d'une synthèse mentale (i.e., combinaison de deux unités représentationnelles) serait dépendante du stockage temporaire en mémoire de travail spatiale (composantes du calepin visuo-spatial). Ces mêmes auteurs définissent un rôle spécifique des représentations verbales qui permettent une « méta » gestion des processus cognitifs impliqués dans la tâche en général. La génération et la maintenance d'images visuelles seraient par ailleurs dépendantes de la composante centrale exécutive du modèle de la mémoire de travail. La synthèse mentale nécessiterait enfin l'abstraction du sens concret habituellement donné aux lettres, pour manipuler seulement les propriétés de formes intégrant la représentation finale du parapluie (Barquero & Logie, 1999).

1.4. *L'image* visuelle : problèmes de généralisation aux autres modalités sensorielles

Kosslyn (1994 ; Kosslyn et al., 2006) conçoit l'image mentale comme étant analogue à la perception objective, pouvant aussi être spécifique de la modalité sensorielle impliquée. L'image mentale serait le résultat d'un procédé d'élaboration pouvant utiliser une grande variété de sources d'informations : visuelles et tactiles (Cornoldi & Vecchi, 2000). Toutefois, la majorité des études sur des adultes voyants met en évidence l'utilisation des processus d'imagerie visuelle. Grâce aux travaux des dernières années, une théorie visuelle des images mentales complète s'est développée autour d'études comportementales, d'imagerie cérébrale, et neurophysiologiques (Kosslyn, 1994 ; Kosslyn et al, 2006). Par contre, certains auteurs affirment qu'aucune théorie aussi complète n'existe pour la modalité tactile (Grunwald, 2008). Le rôle de l'image en perception tactile n'a pas été clarifié. Entre autre, on suppose que les aptitudes spatiales sont dépendantes de processus visuels (Millar & Al-Attar, 2005 ; Thinus-Blanc & Gaunet, 1997), bien que la modalité tactile puisse aussi procurer des informations de formes d'objets, et des représentations similaires aux représentations visuelles (James et al., 2006 ; Lacey & Sathian, 2008 ; Lederman & Klatzky, 1987). Les performances offertes via les modalités sensorielles peuvent être comparées entre des tâches traditionnellement visuelles et leurs répliques tactiles. Les résultats similaires entre ces deux modalités sensorielles permettent d'émettre l'hypothèse des descriptions structurales (i.e., acquisition des mêmes

informations de formes ; voir Lacey & Sathian, 2008 ; Reales & Ballesteros, 1999) et représentationnelles (i.e., codage commun sous forme d'image) suivant l'exploration visuelle et tactile. Par contre, ces similarités ne renseignent pas nécessairement sur le format des contenus représentationnels des deux modalités sensorielles. Nous ne savons pas si certaines tâches d'imagerie tactile nécessitent aussi des images visuelles lors du traitement d'informations tactiles. Il est possible aussi que la modalité tactile dépende d'un autre format de codage et de traitement des informations.

1.5. Format des représentations chez les aveugles précoces et les sujets voyants

L'idée intuitive que nous avons d'une image mentale est qu'elle retient les propriétés des perceptions objectives antérieures (Cornoldi, De Beni, Giusberti, & Massironi, 1998). Par contre, les représentations n'existeraient pas nécessairement sous forme visuelle. Des études chez les aveugles démontrent de fortes capacités représentationnelles, parfois similaires à celles des participants voyants (i.e., Carpenter & Eisenberg, 1978 ; Cornoldi, Calore, & Pra Baldi, 1979). Ces résultats démontrent que les aveugles de naissance peuvent utiliser une forme d'imagerie indépendante d'un système propositionnel ou verbal (i.e., décrire la forme en se basant sur la connaissance préalable) ou d'un code plus abstrait pour la génération des représentations (Cornoldi, Cortesi, & Preti, 1991 ; Cornoldi et al., 1998). N'ayant pas d'expérience visuelle, les aveugles seraient incapables de générer des images en formats visuels (Zimler & Keenan, 1983 ; sauf voir Cornoldi et al., 1998). Les aveugles dépendraient davantage de représentations spatiales (i.e., représentation des coordonnées de formes et relations spatiales de l'objet). Ils auraient des références environnementales relativement réduites (i.e., table, espace proximal). Ils dépendraient plutôt de références égocentriques (i.e., perception des objets en relation aux axes du corps) (Coluccia, Mammarella, & Cornoldi, 2009). L'étude d'un voyant déficient visuel (Farah et al., 1988) suggère que les images visuelles et les images spatiales seraient dépendantes de systèmes représentationnels dissociables. Ce voyant déficient rencontrait des difficultés dans des tâches traditionnelles d'imagerie visuelle, tout en réussissant normalement des tâches d'imagerie spatiale. L'imagerie mentale serait donc activée par différents sous-systèmes de représentation imagée (i.e., spatial vs. visuel ; Carpenter & Eisenberg, 1978 ; Rösler et al., 1993). Chez des participants voyants, certains préfèrent une stratégie de visualisation spatiale (i.e., image spatiale ; représentation des coordonnées d'objets pièce-par-pièce et relations spatiales entre segments d'objets) alors que d'autres

visualisent les objets globalement (i.e., image visuelle ; Kozhevnikov et al., 2005). Nous pouvons donc supposer que comme dans le cas des aveugles, lors d'une tâche d'imagerie tactile sans expérience visuelle préalable, certains participants voyants manifestent une dépendance à un sous-système de représentations spatiales, plutôt qu'à un sous système de représentations visuelles.

1.6. Transferts intermodaux et similarités dans le traitement

Si je touche un objet inconnu, suis-je capable de le reconnaître par la suite par la vue seule ? Qu'est-ce qui me permet de reconnaître un objet au moyen d'une modalité sensorielle différente ? Les adeptes de philosophie reconnaîtront dans ces questions un rapport à l'énigme classique de William Molyneux, vieille de trois cents années (Morgan, 1977). Molyneux demanda à John Locke de répondre à la question :

« ... the question is whether a blind man, on recovering the use of his sight and being presented with a cube and a globe before his eyes, would be able to name them correctly. In other words, would the experience he had gained by touching these objects enable him to name them correctly when they were placed before his eyes? » (Morgan, 1977, p. 6)

Cette question témoigne d'une quête très ancienne. Pour des philosophes empiristes, tels Locke, Berkeley et Hume (1600-1800), une réponse affirmative suggère qu'il existe a priori une conception amodale de l'information spatiale, innée et commune aux deux modalités (Held, Ostrovsky, de Gelder, & Sinha, 2008 ; Morgan, 1977). Une réponse négative suggère plutôt l'idée que l'acquisition des informations spatiales est influencée par l'association ou l'interaction quotidienne entre les deux modalités sensorielles (Helbig & Ernst, 2007 ; Held et al., 2008). Molyneux et Locke étaient d'accords sur l'importance de *l'influence* entre la vue et le toucher pour le développement d'idées communes, ces idées communes étant produites par l'association par expérience entre les deux modalités sensorielles, comme on peut le noter dans la réponse à la question de Molyneux :

« ... the answer to this was 'Not' because to name the visual impression he [blind recovering sight] would have to compare it to some other idea, an idea common between touch and vision. Plainly, such an idea could not be a simple 'sensory impression'; it would have to be something transcending individual impressions, and to which these individual impressions could be referred. » (Morgan, 1977, p. 7)

Par ailleurs, une étude récente (Held et al., 2011) démontre que les aveugles, dont la vision a été rétablie par intervention chirurgicale, ne parviennent pas à reconnaître visuellement des figures géométriques préalablement touchées. Chez les aveugles, la nature des représentations d'objets diffère de celle des représentations des voyants (Millar, 2006). Or, les résultats de Held et collaborateurs (2011) suggèrent qu'un ancien aveugle doit apprendre à voir et associer ses perceptions visuelles à ses souvenirs d'une manipulation tactile d'objets, ce qui peut représenter un défi considérable (Ostrovsky, Meyers, Ganesh, Mathur & Sinha, 2009 ; von Senden, 1960). Par exemple, selon Ostrovsky et collaborateurs (2009), suite à l'intervention chirurgicale, plusieurs mois peuvent être nécessaires pour permettre la perception visuelle adéquate et la structuration de l'environnement visuel (9-18 mois). Les représentations tactiles dans ce cas peuvent être considérées spécifiques. Lorsque les représentations sont spécifiques, elles ne peuvent pas être développées et transférées pour usage dans une autre modalité sensorielle.

Chez des adultes voyants, la question n'est pas tout à fait de même nature, en raison de leur expérience visuelle. Une similarité des traitements des structures spatiales de formes entre le toucher et la vue prévoit l'élaboration de représentations similaires et la possibilité d'échanges entre ces deux modalités sensorielles (James et al., 2006). Ainsi, plusieurs études montrent qu'une expérience préalable dans une modalité sensorielle (tâche de reconnaissance d'objets) permet un transfert d'informations utilisables dans une autre modalité (Ballesteros et al., 1999 ; James, Humphrey, Gati, Servos, Menon, & Goodale, 2002 ; Newell, Ernst, Tjan, & Bulthoff, 2001). Ce transfert serait due aux nombreuses interactions quotidiennes entre la vue et le toucher (Held et al., 2011). De plus, la familiarisation avec une tâche de reconnaissance d'objets, en modalité visuelle ou tactile, active les aires visuelles (James et al., 2006 ; James et al., 2002 ; Sathian et al., 1997 ; Zangaladze, Epstein, Grafton, & Sathian, 1999). Le partage d'informations serait lié à une représentation unique susceptible d'être activée par les deux modalités sensorielles. Une autre possibilité serait liée à l'existence de deux représentations, une tactile et l'autre visuelle, l'une pouvant activer l'autre et vice versa. Les zones multi-sensorielles (i.e., aires visuelles) seraient alors importantes pour le développement et le partage de ces représentations (cf. section 3).

Dans les études utilisant un paradigme de transfert intermodal, les participants vont réaliser une tâche dans deux conditions sensorielles différentes (Ballesteros et al., 1999 ; Easton et al., 1997a ; James et al., 2006). La première condition sert de priming ou de familiarisation ; la deuxième condition permet d'examiner les effets de l'expérience

sensorielle préalable. On juge alors que les transferts positifs s'expliquent par des contenus similaires d'informations entre les deux modalités sensorielles. Le transfert sous forme implicite ne serait pas dépendant de la connaissance préalable des participants vis-à-vis des objets étudiés (i.e., objets non familiers). Comme le montre une revue des études récentes sur les coordinations intermodales, le transfert implicite n'est pas causé par un système symbolique, verbal, ou conceptuel (James et al., 2006). Le transfert implicite se manifesterait plutôt de façon quasi inconsciente, et serait due à une similarité du traitement de l'information spatiale dans les deux modalités sensorielles. Ainsi, une information mémorisée dans une modalité peut être transférée et réutilisée par une autre modalité. Les composantes seraient codées et retenues de la même façon dans les deux modalités sensorielles (Easton et al., 1997a ; Easton et al., 1997b ; Reales & Ballesteros, 1999) suggérant la similarité de la représentation en mémoire des éléments de forme quelle que soit la modalité sensorielle considérée.

D'un point de vue méthodologique, les transferts intermodaux doivent être comparés à une condition contrôle, sans changement des modalités sensorielles lors de deux tests consécutifs (Hatwell, 2000b). On utilisera alors des groupes intramodaux et des groupes intermodaux pour clarifier le statut des similarités/dissimilarités de traitement entre modalités sensorielles différentes. Avec cette méthode, le transfert d'informations d'une modalité à l'autre n'est pas toujours avéré (Behrmann & Ewell, 2003; Hatwell, 1983 ; Hatwell, 2000b ; Streri, 2000). Les transferts intermodaux seraient souvent moins importants que l'amélioration intramodale (visuel – visuel ou tactile – tactile). L'asymétrie des transferts (intermodaux vs. intramodaux¹) suggère une certaine spécificité dans le traitement des informations. Nous sommes ainsi devant la proposition d'une équivalence partielle des deux modalités sensorielles (Norman, Norman, Clayton, Lianekhammy, & Zielke, 2004), plutôt qu'une parfaite correspondance des représentations dans les deux modalités sensorielles (Gibson, 1966). James J. Gibson pensait que les deux modalités sensorielles pouvaient acquérir essentiellement les mêmes informations spatiales, sous forme « d'invariants universels » d'objets (i.e., arrêtes, sommets de formes, etc.). Selon lui, les invariants seraient interprétés de la même façon suite à une exploration visuelle ou tactile, malgré des temps plus longs en modalité tactile. La représentation unifiée découlant de la perception d'objets, par la vue ou le toucher, devait naturellement donner suite à des transferts intramodaux et intermodaux égaux, selon Gibson (1966).

¹ Ici et dans le reste de ce travail, nous utilisons aussi la terminologie « transfert intramodal » pour décrire l'apprentissage intramodal.

Dans les études sur les transferts intra – et inter – modaux, on compare ainsi quatre conditions (Tableau 1). Un critère important est que les résultats soient similaires pour une modalité sensorielle donnée lors d'une première étape (familiarisation) (Hatwell, 2000b). Si les transferts intramodaux sont équivalents aux transferts intermodaux, nous pouvons alors conclure à un traitement indépendant d'une modalité sensorielle spécifique (Easton et al., 1997a). On suggère alors une équivalence sensorielle entre la vue et le toucher. Une asymétrie des transferts intermodaux suggère plutôt une dépendance sensorielle. Certaines modalités donnent suite à des transferts plus importants (Behrmann & Ewell, 2003). Le cas le plus extrême, tel que démontré pour des aveugles ayant récupéré la vue, témoigne d'une spécificité des représentations tactiles : aucun échange ou transfert n'est possible du toucher vers la vue. Toutefois, un transfert de la vue vers le toucher suggère l'utilisation de représentations visuelles lors du traitement tactile (Hatwell, 1983).

Tableau 1 : Schéma des différentes conditions de transfert et résultats attendus.

Conditions	Familiarisation → Test	Définition des gains ou transferts
Intramodale	<u>V</u> isuel → <u>V</u> isuel	Apprentissage perceptuel visuel
	<u>T</u> actile → <u>T</u> actile	Apprentissage perceptuel tactile
Intermodale	<u>V</u> isuel → <u>T</u> actile	Transfert d'informations visuelles
	<u>T</u> actile → <u>V</u> isuel	Transfert d'informations tactiles

1.7. Rotation mentale *d'objets*

L'étude princeps de Shepard et Metzler (1971) a permis de montrer l'utilité de l'imagerie visuelle dans une tâche de rotation mentale. Suite à la présentation visuelle de deux objets tridimensionnels, les participants devaient décider le plus rapidement possible si ces objets étaient identiques ou différents (Figure 2, p. 19). Les objets étaient constitués de dix cubes collés face contre face de manière à former une figure composée de quatre segments et trois angles droits. Des paires successives d'objets étaient présentées sur un écran d'ordinateur. Les disparités angulaires entre les objets variaient systématiquement de 0° à 180°. Les résultats ont démontré une relation linéaire entre le temps de réponse et la disparité angulaire : plus les disparités angulaires augmentent, plus les temps de réponse augmentent. Selon Shepard et Metzler (1971), les participants ont encodé l'information relative aux objets et reconstitué une image mentale conforme à une représentation de l'un

ou l'autre de ces objets. Cette image aurait été manipulée permettant de réaligner mentalement deux objets pour attester de leur identité.

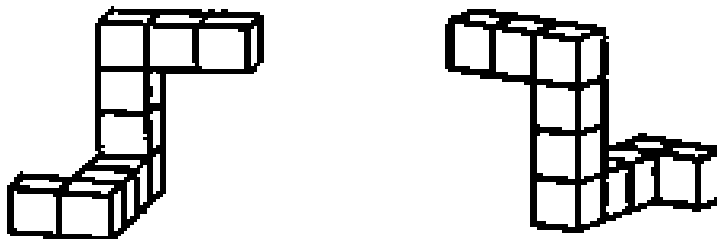


Figure 2. Exemple d'une paire d'objets identiques utilisée dans l'étude de Shepard et Metzler, 1971 (disparité angulaire de 170°).

La rotation mentale correspond donc à l'aptitude d'un participant à faire tourner mentalement un objet pour effectuer une comparaison imagée (Corballis & McMaster, 1996 ; Kosslyn, DiGirolamo, Thompson, & Alpert, 1998 ; Parsons, 1987 ; Shepard & Cooper, 1982 ; Shepard & Metzler, 1971). La qualité de l'image dépendrait de sa netteté, de son exactitude, et de son contrôle (Hoyek, Collet, & Guillot, 2010). Cette manipulation mentale d'images correspondrait, ou serait analogue, à la rotation d'objets réels (perception objective ; Shepard & Cooper, 1982). Des études comportementales ont montré que la rotation mentale ne dépendait pas nécessairement d'un encodage visuel, mais qu'elle pouvait se faire via la modalité tactile (Carpenter & Eisenberg, 1978; Dellantonio & Spagnolo, 1990; Prather & Sathian, 2002; Rösler et al., 1993 ; Wraga, Swaby, & Flynn, 2008).

Quelle que soit la modalité sensorielle sollicitée, des études neurophysiologiques ont identifié la participation active du cortex pariétal pour la rotation mentale (Cohen et al., 1996 ; Röder, Rösler, & Hennighausen, 1997 ; Rösler et al., 1993, Tagaris et al., 1998 ; cf. section 3). Le cortex pariétal serait aussi une zone convergente pour le traitement des informations visuelles et tactiles relatives aux formes d'objets (Amedi, Malach, Hendler, Peled, & Zohary, 2001 ; cf. section 3). D'autres études ont montré une forte activation des zones visuelles de traitement dans des tâches de rotation mentale de stimuli visuels (Cohen et al., 1996; Wraga, Shepard, Church, Inati, & Kosslyn, 2005) ou tactiles (Prather et al., 2004; Sathian, 2005).

Ces résultats peuvent suggérer des processus de traitement similaires dans les deux modalités sensorielles. Dans cette perspective, la manipulation d'images mentales visuelles

dans une tâche spatiale serait possible dans les deux conditions sensorielles (voir Klatzky & Lederman, 1987). Toutefois, dans des tâches de rotation mentale tactile, des chercheurs ont montré une aptitude d'imagerie spatiale développée chez les aveugles et chez les voyants (Carpenter & Eisenberg, 1978; Röder et al., 1997; Rösler et al., 1993 ; Marmor & Zaback, 1976). En revanche, les aveugles congénitaux réussissent moins bien les tâches de rotation mentale que les aveugles tardifs et les voyants. L'expérience visuelle, bien qu'elle ne soit pas absolument nécessaire, pourrait ainsi favoriser l'aptitude spatiale tactile. Des résultats tactiles similaires aux résultats visuels ont souvent été interprétés comme soulignant l'activation, le maintien et la manipulation d'une représentation visuelle chez des sujets voyants lors de la rotation mentale tactile. Ainsi le décrivent Kaas, Stoeckel et Rainer (2008), considérant les processus tactiles d'imagerie mentale, à la fois chez les sujets aveugles et les sujets voyants :

« Although this effect [mental rotation] was seen in blind subjects as well, it still seems likely that sighted subjects use visual imagery as the predominant strategy for [tactile] mental rotation. » (p. 119)

Selon ces auteurs, la rotation mentale tactile impliquerait un processus de contrôle actif pouvant aussi dépendre du calepin visuo-spatial de la mémoire de travail (voir aussi Zuidhoek, Kappers, van der Lubbe, & Postma, 2003). Par ailleurs, selon ces auteurs, aucun exemple empirique convainquant ne démontre la manipulation d'informations tactiles spécifiques dans la mémoire de travail (Baddeley, 2003 ; Kaas et al., 2008 ; sauf voir Sinclair, Kuo, & Burton, 2000). Selon ce point de vue, l'imagerie visuo-spatiale serait impliquée dans le stockage de stimuli non familiers, l'encodage tactile étant par ailleurs apparié à des processus de reconnaissance visuelle (Beaumont, 1981). Selon Lacey et Sathian (2008), l'indépendance sensorielle (ou une dépendance visuelle) en rotation mentale serait démontrée non seulement par des représentations similaires, mais aussi par des processus de manipulation des représentations similaires :

« If vision and touch engage a common representational system, then we would expect to see this reflected in similarities between visual and haptic [tactile] processing of these representations. » (p. 255)

Dans le contexte d'étude des transferts intermodaux, l'utilisation de tâches de rotation mentale permettrait d'évaluer les similarités et les dissimilarités entre traitements

via les deux modalités sensorielles. L'inégalité des transferts entre conditions intermodales et intramodales indiquerait non seulement une dissimilarité des formats de représentations visuelles et tactiles, mais aussi une dissimilarité des processus de manipulation des représentations et par conséquent une dissimilarité de la rotation mentale visuelle et tactile. Comme nous le verrons tout au long de cette introduction (cf. section 2), les modalités sensorielles se qualifient par des modes de traitement différents (i.e., encodage), pouvant dépendre de références spatiales spécifiques. Par conséquent, la question que nous évaluerons est de savoir si ces différences peuvent néanmoins donner suite à la formation et à la manipulation de représentations indépendantes d'une modalité ou d'une autre.

1.8. Spécificité des références spatiales visuelles et tactiles en rotation mentale

L'information spatiale doit être définie selon un ou des cadres de référence spatiale, pour spécifier la position, l'orientation, et la direction des stimuli dans des tâches cognitives (Millar & Al-Attar, 2004 ; Zacks & Michelon, 2005). Les cadres de référence définissent un point d'origine (i.e., corps, objets, environnement) et un ou plusieurs axes directionnels (i.e., haut-bas ; gauche-droite ; devant-derrrière) par lesquels un objet est inspecté. Le mouvement de la main nous permet de traiter les relations spatiales entre les segments d'un objet, dans une référence centrée sur l'objet (Zacks, 2008). Par contre, la comparaison entre objets nécessite une activité perceptuelle structurant l'espace dans une référence allocentrique ou environnementale. En rotation mentale tactile, trois références spatiales pour la structuration de l'espace seraient nécessaires : l'information proprioceptive de la position de la main, une référence centrée-sur-la-main et une référence centrée-sur-le-corps (Volcic, Winjntjes, & Kappers, 2009 ; Volcic, Wijntjes, Kool, & Kappers, 2010). Au final, la perception tactile permettrait de structurer l'espace allocentrique pour la comparaison d'objets, en passant toutefois par la structuration de références égocentriques. Ainsi, la rotation mentale ne dépendrait pas des mêmes références pour l'exploration visuelle et l'exploration tactile (voir aussi Carpenter & Eisenberg, 1978). Selon l'hypothèse des références multiples, la disponibilité des sources d'information visuelles serait aussi déterminante pour la réussite à des tâches spatiales tactiles (Kennett, Taylor-Clarke, & Haggard, 2001 ; Millar, 1994 ; Millar & Al-Attar, 2005 ; Newport, Rabb, & Jackson, 2002). Ainsi, les références environnementales (i.e., horizontales et verticales) rendues disponibles par la vue seraient bénéfiques pour la formation des références allocentriques tactiles. De même, une main posée à plat sur une

table donne de l'information sur les références physiques de la tâche, permettant une meilleure perception tactile des orientations d'objets (Gentaz, 2009).

Une étude de Volcic et collaborateurs (2010) a permis d'évaluer les effets de l'exploration transmodale (visuo-tactile) d'objets lors d'une tâche de rotation mentale. Les participants devaient décider si deux objets étaient identiques, en utilisant les deux modalités sensorielles à chaque présentation de paires. Le modèle était touché et comparé visuellement à l'objet de comparaison. En général, les résultats ont démontré l'augmentation des temps de réponse avec l'augmentation des disparités angulaires. Volcic et al. (2010) ont émis l'hypothèse que la qualité des transferts intermodaux en rotation mentale pouvait éventuellement dépendre d'une résolution des conflits entre références visuelles et références tactiles. Les références seraient traduites d'une modalité à une autre, ou elles contribueraient à la représentation d'un espace multi-sensorielle.

1.9. Résumé

L'imagerie mentale suscite une vive polémique concernant le format et l'utilité des images mentales. Des auteurs lui accordent un rôle psychologique important dans l'apprentissage, la mémoire, la pensée, la motivation, l'apprentissage moteur, l'entraînement sportif, et les aptitudes spatiales. Plusieurs théories (i.e., imagée, propositionnelle, indéterministe et mémoire de travail) ont ainsi été élaborées pour expliquer la nature du traitement des informations dans des tâches d'imagerie mentale. Une question encore largement ignorée consiste à évaluer la nature des représentations mentales découlant d'un traitement spécifique tactile. De bonnes aptitudes d'imagerie mentale ont été démontrées lors du traitement tactile d'informations, chez les aveugles. Encore faut-il évaluer l'importance de la vue pour le développement des représentations et le traitement tactiles, chez des sujets voyants. Le paradigme de transferts intermodaux permet d'évaluer l'équivalence des traitements perceptuels entre la vue et le toucher. Par ce paradigme, il est ainsi suggéré qu'une meilleure définition des similarités et dissimilarités entre rotation mentale visuelle et rotation mentale tactile pourra être établie. Une étude combinant le paradigme de rotation mentale et le paradigme de transferts intermodaux pourra nous informer concernant non seulement la similarité des représentations visuelle et tactile, mais aussi concernant la similarité entre modalités sensorielles du point de vue de la manipulation mentale des représentations.

2. Modalités sensorielles et reconnaissance d'objets

2.1. Perception cutanée et perception haptique

Nous pouvons distinguer deux types de perception tactile : la perception cutanée et la perception haptique. La perception cutanée est passive puisqu'elle n'implique pas de mouvements corporels. Les mécanorécepteurs cutanés répondent aux pressions exercées sur la peau suivant l'application d'une stimulation. Par exemple, lorsqu'un expérimentateur fait tourner un objet sur la main immobile d'un participant ce dernier ressent l'aspect matériel de l'objet, sans pouvoir développer une représentation précise de la forme (Gibson, 1966).

La perception cutanée est plutôt limitée par l'exiguïté du champ réceptif (i.e., taille de la zone de stimulus), lorsque l'objet est maintenu immobile sur la peau (i.e., pointe d'un crayon sur la paume de main). Elle permet seulement d'estimer les dimensions grossières de la zone stimulée et la position du stimulus (i.e., espace cutané). Selon Spence et Gallace (2007 ; Gallace & Spence, 2010), la perception cutanée repose sur une capacité attentionnelle limitée, pouvant encoder un seul stimulus tactile à la fois.

La perception haptique correspond à la stimulation tactile dérivée des pressions cutanées et des mouvements vis-à-vis des objets. Elle implique les mécanorécepteurs de la peau et les récepteurs proprioceptifs situés dans les muscles, tendons et articulations des segments mobiles du corps. Nous devons effectuer des mouvements d'exploration avec notre main pour compenser l'exiguïté du champ réceptif cutané (Gibson, 1966 ; Hatwell, 2000a ; Katz, 1925/1989 ; Revesz, 1950). Ces mouvements permettent une description intégrale de la forme d'un objet et de ses propriétés spatiales, le temps d'exploration pouvant toutefois s'avérer très long.

La perception haptique est complexe puisqu'elle nécessite l'intégration de multiples sources d'informations (Gentaz, 2009). Alors que la perception cutanée (avec ou sans mouvement) donne l'information de la position (i.e., Où), la perception haptique permet en plus d'identifier l'objet (i.e., Quoi). Ces deux processus ont été distingués du point de vue des structures neuronales (Reed, Klatzky, & Halgren, 2005 ; voir aussi James, Kim, & Fisher, 2007). Ils correspondent, par analogie, aux voies dorsale (localisation spatiale et mouvement) et ventrale (perception de l'objet) du système visuel (cf. voir plus bas ;

Gentaz & Badan, 2000 ; Goodale & Milner, 1992 ; Paillard, 1991 ; Schneider, 1969). Outre le traitement des informations spatiales, la perception haptique est particulièrement adaptée pour la perception des propriétés matérielles d'un objet (i.e., dureté ; texture) (Lederman & Klatzky, 1997 ; Picard, Dacremont, Valentin, & Giboreau, 2003). Dans le reste de ce travail, nous préférons l'utilisation du terme « tactile » à celui de haptique, tout en tenant compte des particularités du système perceptuel tactile.

2.2. Procédures exploratoires tactiles

En perception tactile, le stimulus dépend de la façon dont l'objet est exploré. La représentation finale serait liée à la qualité des mouvements d'exploration de la main. Plusieurs procédures d'exploration peuvent être utilisées pour atteindre des objectifs précis (Gentaz, Hatwell, & Streri, 2003 ; Hatwell, 2000a ; Lederman & Klatzky, 1987). Nous parlerons principalement de « l'enveloppement » de l'objet et du « suivi des contours » de l'objet pour la reconnaissance de formes géométriques.

La procédure d'enveloppement manuelle est utilisée en début de recherche tactile, pour une représentation grossière des arêtes de la forme globale et du volume de l'objet (Figure 3a, p. 25). Par l'enveloppement, le participant utilise tous ses doigts, ce qui augmente la taille du champ perceptif. Pour acquérir les dimensions de taille, le participant peut passer d'une exploration impliquant tous les doigts à une procédure par opposition index-pouce (Figure 3b). L'accès aux éléments d'un objet peut aussi passer par un seul doigt, ce qui cause toutefois plus d'erreurs perceptives et la formation de représentations partielles d'objets (Klatzky & Lederman, 1993 ; Jansson & Monaci, 2004). Lorsque le nombre d'effecteurs est réduit (1 à 2 doigts), les mouvements ne produisent pas suffisamment de déformations mécaniques sur la surface de la peau, réduisant considérablement l'accessibilité aux dimensions spatiales. Une autre procédure exploratoire, le suivi des contours, permet de décrire la forme exacte de l'objet (Figure 3c). Les participants cherchent ainsi à spécifier les informations de contour ou d'une partie locale du contour (trait ou arête), pour une description précise de la forme de l'objet. Enfin, l'information des propriétés matérielles (i.e., texture) est rapidement accessible par des mouvements latéraux (de frottement) sur la surface d'un objet.

L'exploration tactile implique plusieurs changements de procédures exploratoires et plusieurs planifications de mouvements. L'exploration s'adapte aux caractéristiques spatiales de l'objet, liées à la forme globale, à la taille, et à l'orientation (Gentaz &

Hatwell, 2000 ; Lederman & Klatzky, 1987). La connaissance des objets et les attentes des participants contribuent aussi à l'élaboration de stratégies exploratoires diverses (Lederman & Klatzky, 1990). En général, l'exploration tactile se poursuit jusqu'à ce que le participant juge complète sa représentation de l'objet, qu'elle soit adéquate ou non.

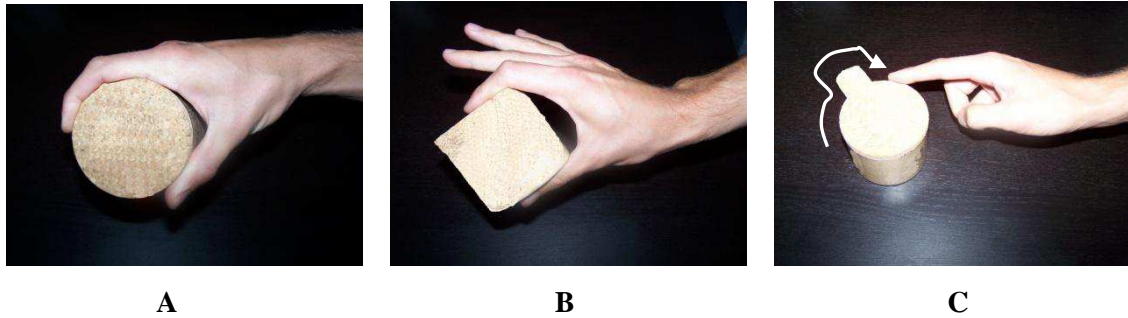


Figure 3. Procédures d'exploration tactile : A - enveloppement ; B – opposition pouce-index ; C - suivi des contours.

2.3. Vision passive et vision active

Nous pouvons distinguer deux types de vision : la vision passive et la vision active (Aloimonos, Weiss, & Bandyopadhyay, 1988 ; Findlay & Gilchrist, 2003 ; Gibson, 1966). La vision passive est involontaire, et joue un rôle important dans la reconnaissance rapide des éléments primitifs d'un objet, ses arrêtes et ses axes. Les éléments primitifs visuels « sautent aux yeux », automatiquement, suite à l'exposition brève d'un objet sur la zone fovéale de l'œil immobile (Marr, 1982 ; Treisman & Gormican, 1988).

La vision active implique la mobilité des yeux (Aloimonos et al., 1988). Six muscles extra-oculaires permettent d'orienter nos yeux sur des cibles déterminées. Les mouvements oculaires sont volontaires, permettant l'activation d'une boucle rétroactive entre perception et cognition (Findlay & Gilchrist, 2003). Le système visuel implique deux grandes voies neuro-anatomiques jouant différents rôles dans le traitement des informations, les voies dorsale et ventrale (Goodale & Milner, 1992 ; Schneider, 1969 ; Ungerleider & Mishkin, 1982). La voie ventrale intervient dans la description et l'identification des objets (i.e., Quoi) et la voie dorsale intervient dans la détermination de la position spatiale d'un objet dans l'espace (i.e., Où ; mouvement).

2.4. La modalité visuelle : fixations, saccades et patrons de mouvements oculaires

Certaines études ont contribué à mieux comprendre ce que les yeux font durant l'inspection d'objets (Pailhous, 1970). L'analyse des mouvements oculaires donne ainsi des informations concernant les processus cognitifs (Deangelus & Pelz, 2009 ; Findlay & Gilchrist, 2003 ; Just & Carpenter, 1978 ; Just & Carpenter, 1985 ; Liversedge & Findlay, 2000 ; Rayner, 1995 ; Yarbus, 1967) et les stratégies cognitives (Vigneau, Caissie & Bors, 2006, voir Annexes ; Vakil, Lifshitz, Tzuriel, Izhak, & Arzuwan, 2011 ; Bethell-Fox, Lohman, & Snow, 1984) lors de la réalisation d'une tâche. Elle permet une analyse qualitative de l'encodage et du traitement des informations des participants (Lohse & Johnson, 1996 ; Salvucci & Anderson, 2001 ; Viviani, 1990).

L'analyse des mouvements oculaires concerne entre autre des caractéristiques de bas niveau : les fixations oculaires et les saccades oculaires. Les fixations spécifient l'endroit inspecté par un participant. Lors de l'inspection d'images, les durées de fixations peuvent varier entre 50 ms et 1000 ms, avec une moyenne de 330 ms (Henderson & Hollingsworth, 1999). Les saccades définissent les mouvements de l'œil entre les fixations. Lors des saccades, l'encodage des informations n'est pas possible (Kowler, 1990). Les mouvements oculaires sont très rapides et permettent des changements de fixations constants. L'exploration visuelle d'un participant se poursuit habituellement jusqu'à ce qu'il juge complète sa représentation de l'objet. La Figure 4 (p. 27) illustre la prise d'informations visuelles sur la même forme cylindrique qu'à la Figure 3c (p. 25). Le cylindre serait « identifié » rapidement, nécessitant peu de fixations et peu de mouvements d'exploration. Toutefois contrairement au toucher (Figure 3c), la vision n'aurait pas accès aux segments locaux sur la façade « cachée » du cylindre. Dans ce sens, chaque système perceptif a probablement sa « vue » préférée en termes de référentiel « déictique » (centrée sur l'observateur) : l'avant de l'objet pour le système visuel et l'arrière de l'objet pour le système tactile (Newell et al., 2001).

Les premières analyses de mouvements oculaires ont été menées sur des patrons d'inspection d'images, ou d'œuvres d'arts. Buswell (1935) a suggéré que la première inspection d'une image reste globale et approximative (i.e., paysage). Elle serait suivie d'inspections plus précises des zones de l'image jugées importantes ou informatives (i.e., figures humaines ; voir aussi Mackworth & Morandi, 1967). Buswell a noté des différences individuelles d'inspection ainsi que des patrons d'inspection partielle des images. Plus tard, Yarbus (1967) montrait des patrons variant avec la tâche effectuée.

Selon lui, l'organisation des patrons de mouvements oculaires serait influencée par l'expérience préalable et les consignes de tâche.

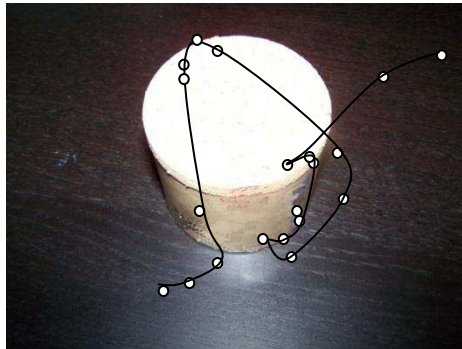


Figure 4. Procédure d'exploration visuelle : fixations (points blancs) et saccades (lignes).

2.5. Comparaison des modalités sensorielles : similarités et différences

Lederman et Klatzky (1997) ont souligné une différence importante entre les deux modalités sensorielles, liée à l'exiguïté du champ perceptif tactile. La modalité tactile permet seulement une synthèse lente des informations spatiales, alors que les propriétés matérielles seraient plus rapidement intégrées (Klatzky & Lederman, 2000). Par le toucher nous reconnaissons avant tout l'information sur les arrêtes. L'information spatiale, celle qui spécifie la localisation et l'orientation des arrêtes, est disponible seulement après une inspection tactile globale de l'objet. Lakatos et Marks (1999) ont par ailleurs démontré une préférence tactile pour les traits locaux et une préférence visuelle pour les traits globaux de formes. Si des participants parviennent à reconnaître un objet au toucher, ils ont de la difficulté à créer une représentation de l'intégralité de l'objet.

Les procédures exploratoires tactiles offrent « une appréhension morcelée, plus ou moins cohérente, parfois partielle et toujours très séquentielle » d'un objet (Hatwell, 2000a, p. 2). Elles nécessitent davantage de temps et impliquent lourdement les systèmes cognitifs (James et al., 2007) liés à la mémoire de travail (Paz, Maya, & Ballesteros, 2007) et à l'attention (Spence & Gallace, 2007). La modalité tactile encode des informations sur une zone relativement restreinte, alors que la perception visuelle serait plus globale et immédiate (Loomis, 1981). En contexte d'exploration, les participants doivent effectuer davantage de répétitions de mouvements sur un objet pour compenser ces lacunes (Gentaz, 2009).

La modalité visuelle est considérée comme étant la modalité privilégiée pour l'identification d'objets (Millar & Al-Attar, 2002 ; Thinus-Blanc & Gaunet, 1997). Entre

autre, elle domine les informations tactiles dans des études de conflits inter-sensoriels, lorsque les traitements visuel et tactile sont menés simultanément (Rock & Victor, 1964). Ainsi, malgré la disponibilité d'informations tactiles stockées en mémoire, celles-ci sont en partie ignorées, jugées secondaires à l'information visuelle. Ces résultats suggèrent une plus grande importance de l'expérience visuelle pour les transferts intermodaux dans des tâches de reconnaissance de formes.

Par contre, d'autres travaux contestent la dominance de la modalité visuelle sur la modalité tactile (Heller & Ballesteros, 2006). Avec suffisamment de temps, l'information tactile permet de développer des représentations spatiales robustes, pouvant être similaires aux représentations spatiales visuelles d'objets tridimensionnels (James et al., 2006). Malgré les différences, la modalité tactile et la modalité visuelle peuvent encoder les mêmes structures de formes (Reales & Ballesteros, 1999). Elles peuvent catégoriser les objets de façon similaire, selon les informations géométriques (Garbin, 1990), et elles peuvent reconnaître et distinguer efficacement des objets naturels (Norman et al., 2004). Enfin, les représentations géométriques tactiles-visuelles seraient considérées au moins partiellement équivalentes (Hatwell, 2000a ; Ittyerah, 2010 ; Norman et al., 2004). Les similarités de traitement peuvent ainsi suggérer une équivalence des transferts intermodaux. Selon ce point de vue, autant d'importance serait alors donnée à l'information tactile qu'à l'information visuelle lors des transferts d'information.

2.6. Catégorisation visuelle et tactile *d'objets ou traits d'objets*

Une catégorie comprend une collection de stimuli ou d'objets ayant un ou des traits en commun (Homa, 1984). Quelques études ont évalué la catégorisation d'objets suite à l'inspection tactile. Les participants devaient généralement inspecter des objets dont les caractéristiques variaient de façon paramétrique, sur une ou plusieurs dimensions données (i.e., texture ; forme). Les expérimentateurs demandaient ensuite aux participants de classer librement les objets se « ressemblant » le plus dans une catégorie commune. Les adultes ont catégorisé des objets sur la base d'une seule dimension tactile jugée différente des autres (Berger & Hatwell, 1996 ; Smith, 1981 ; 1989). Ainsi, ces résultats suggèrent l'efficacité de la modalité tactile pour la catégorisation d'objets.

La perception des similarités entre objets est importante pour la comparaison d'objets et la formation des catégorisations parfois très cohérentes lorsque l'on compare la vue et le toucher. Cooke, Jäkel, Wallraven et Bühlhoff (2007) ont démontré l'existence des

catégorisations visuelles et tactiles similaires basées sur les formes d'objets. La catégorisation s'organise de façon hiérarchique (Rosch, Mervis, Gray, Johnson, & Boyes-Braem, 2004, 1976) pouvant différer selon la modalité sensorielle. Les propriétés matérielles sont plus importantes pour la catégorisation tactile (Klatzky & Lederman, 2007 ; Lederman & Klatzky, 1990). Toutefois, par des études d'échelonnement multidimensionnel (multidimensional scaling), Garbin et collaborateurs ont démontré que les mêmes attributs (taille, symétrie et complexité) déterminent les catégorisations subjectives tactiles et visuelles (Garbin, 1990 ; Garbin, 1988 ; Garbin & Bernstein, 1984). Malgré cela, dans leurs études, les catégorisations par échelles visuelles et tactiles se sont montrées moyennement cohérentes (67% des stimuli).

La cohérence des catégorisations permet de prédire un traitement des mêmes informations de formes, en condition visuelle ou en condition tactile. Comme pour la vue (Rosch et al., 1976), le toucher encode les informations utiles de formes pour la catégorisation (i.e., catégories générales ; Klatzky, Lederman, & Reed, 1987), et pour la reconnaissance (Lederman & Klatzky, 1990). Ainsi, les dimensions de différenciation d'objets (Owen & Brown, 1970a ; Pick & Pick, 1966) et les effets de la complexité évaluée par le nombre de côtés des formes (Brumaghin & Brown, 1969 ; Owen & Brown, 1970b) sont très similaires pour la vue et le toucher. On peut alors prédire des résultats similaires dans des tâches d'aptitudes spatiales nécessitant l'encodage d'informations et la discrimination, comme dans le cas de tâches de rotation mentale.

2.7. Reconnaissance d'*objets familiers* et de formes géométriques

Dans une étude de Klatzky, Lederman et Metzger (1985), des participants parvenaient, sans erreurs, à nommer des objets familiers suite à l'exploration tactile. Ces auteurs ont ainsi qualifié la modalité tactile comme un système expert dans la reconnaissance d'objets familiers. D'autres auteurs se sont interrogés sur l'existence d'un système tactile de traitement des informations spatiales, indépendant de l'expérience visuelle chez des sujets voyants (Deibert, Kraut, Kremen, & Hart, 1999 ; Klatzky, Lederman, & Reed, 1987). Ce système, s'il existe, serait spécifique et sans rapport avec l'expérience visuelle. Seulement, la vue et le toucher fonctionnent de façon quasi inséparable au quotidien. Par exemple, la vue coordonne nos interactions tactiles avec les objets, et la manipulation d'objets (Ballard, Hayehoe, & Whitehead, 1992 ; Johansson, Westling, Bäckstrom, & Flanagan, 2001 ; Land, Mennie, & Rusted, 1999). Le toucher peut

néanmoins fonctionner seul dans des situations d'occlusion visuelle temporaire. Or, lorsque nous cherchons un objet précis dans l'obscurité, une image visuelle de la forme de l'objet améliore son identification. L'indépendance tactile chez des sujets voyants ne serait donc pas nécessairement avérée pour la reconnaissance d'objets.

Des études neurophysiologiques démontrent une dissociation neuronale entre le traitement tactile d'informations spatiales et matérielles (i.e., texture) liées aux objets (Reed, Shoham, & Halgren, 2004²). Alors que le traitement des informations matérielles d'objets familiers est indépendant de l'expérience visuelle, l'activation des aires visuelles en cours de traitement tactile des informations spatiales de formes suggère une dépendance visuelle (Stoesz, Zhang, Weisser, Prather, Mao, & Sathian, 2003). Certains traitements dépendraient de l'expérience visuelle, alors que d'autres seraient dépendants d'un traitement spécifique tactile.

Les études sur des patients cérébro-lésés illustrent ce point. Par exemple, des patients présentant des lésions au niveau de l'aire somesthésique secondaire (SII) montrent des déficits notables en reconnaissance tactile d'objets familiers (Bohlhalter, Fretz, & Weder, 2002 ; Caselli, 1991). La reconnaissance d'objets familiers par le toucher a aussi sollicité des zones du cerveau associées au traitement somesthésique (SII et insula ; aires somesthésiques ; Reed et al., 2004). Selon Reed et collaborateurs (2004), ces patrons d'activation témoignent d'une intégration sensorimotrice pour la reconnaissance d'objets familiers. Ils ont été observés avec des participants en situation d'exploration d'objets familiers pouvant être nommés sur la base de plusieurs caractéristiques matérielles (voir aussi Bonda, Petrides, & Evans, 1996 ; Roland, O'Sullivan, Kawashima, 1998 ; Servos, Lederman, Wilson, & Gati, 2001), et en relativement peu de mouvements exploratoires sur les objets (Klatzky & Lederman, 1995). En revanche, l'implication de la SII pour la reconnaissance des propriétés géométriques d'objets n'a pas été démontrée (Kitada et al., 2006 ; Roland et al., 1998 ; Servos et al., 2001 ; Stoesz et al., 2003). De plus, des études faisant varier seulement les dimensions spatiales (i.e., orientation spatiale ; forme) ont montré une activation sélective des aires visuelles durant l'exploration tactile passive (Sathian et al., 1997 ; Zangaladze et al., 1999) et active (Amedi et al., 2001 ; Amedi, Jacobson, Hendler, Malach, & Zohary, 2002 ; Zhang et al., 2004).

Selon James et al. (2007), la présentation d'objets familiers dans certaines études aurait motivé des procédures exploratoires spécifiant les propriétés matérielles des objets et

² Cette dissociation neuronale aurait aussi été observée récemment pour le système visuel (Sathian *et al.*, 2011).

non les propriétés géométriques ou spatiales de formes. Le traitement tactile de formes pourrait ainsi impliquer des processus visuels, ou des représentations visuelles. Du moins, le traitement des informations encodées par les deux modalités sensorielles est considéré comme similaire dans certaines situations. Des chercheurs ont suggéré que l'information tactile pouvait être convertie en images visuelles ou stockée temporairement dans un buffer visuel suite à l'exploration tactile d'objets non familiers (Bonda et al., 1996 ; Bushnell & Baxt, 1999 ; Easton et al., 1997a ; Kerst & Howard, 1978 ; Klatzky & Lederman, 1987 ; Reales & Ballesteros, 1999). L'activation du cortex visuel en condition tactile serait dépendante des objets utilisés. Ceux-ci doivent être constitués d'informations de formes non familières, nécessitant l'exploration des contours dans l'espace et le temps. Dans ces circonstances, selon Reed et collaborateurs (2004), une représentation tactile peut être convertie en image visuelle et « re-perçue par les processeurs visuels ». Ces résultats suggèrent que dans un contexte de transferts d'informations spatiales, il serait possible d'observer une dépendance visuelle, marquée par de meilleurs résultats visuels et des transferts plus importants en modalité tactile, suite à une première expérience visuelle.

3. Modalités sensorielles et organisation multi-sensorielle du cerveau

3.1. Représentations de formes géométriques, images et zones bimodales

Le traitement tactile des propriétés géométriques (Iwamura & Tanaka, 1978) et matérielles (i.e., texture ; Hsiao, Johnson, & Twombly, 1993) suit des voies neuronales indépendantes. Cette distinction est effective à la hauteur du gyrus post-central, dans la zone primaire somesthésique (Iwamura & Tanaka, 1978 ; James et al., 2007). Les informations matérielles sont traitées par la zone secondaire somesthésique, alors que les informations spatiales (géométriques) sont traitées par le cortex visuel. Certaines zones (décrites plus bas) sont ainsi considérées comme bimodales ou « multisensorielles » (Pascual-Leone & Hamilton, 2001), puisqu'elles permettent le traitement visuel et tactile d'informations ou la convergence des traitements d'informations de différentes modalités sensorielles.

La similarité des patrons d'activation suggère la formation de représentations communes visuelles et tactiles, en cours de tâche (Prather & Sathian, 2002 ; Reales & Ballesteros, 1999). S'il est vrai que nos modalités sensorielles sont spécialisées pour certaines informations (i.e., propriétés matérielles « fines » par le toucher ; Ballesteros &

Heller, 2008), elles peuvent souvent produire des informations redondantes (Gibson, 1966 ; Hatwell, 2000a). Elles peuvent ainsi enrichir la perception dans plusieurs activités (Pascual-Leone & Hamilton, 2001 ; Streri, 2000), par un jeu constant d'influences et de coordinations intermodales (i.e., sports ; préparation à la préhension d'objets ou à l'action). Enfin, les différentes modalités sensorielles permettent d'organiser une perception unifiée du monde. Les zones bimodales jouent un rôle crucial pour la généralisation des percepts créés suite à l'exploration par différentes modalités sensorielles (Driver & Noesselt, 2008 ; Pascual-Leone & Hamilton, 2001).

Des chercheurs se sont intéressés aux zones bimodales (Figure 5, p. 33) et aux points d'interactions structurales impliquant les deux modalités sensorielles. Des zones impliquant le traitement des informations visuelles et tactiles incluent le sillon intrapariétal (IPS)³ situé dans l'aire 39 de Brodmann, qui délimite le lobule pariétal supérieur et le lobule pariétal inférieur. Cette zone est considérée comme un site commun pour la perception géométrique (Bodegard, Geyer, Grefkes, Zilles, & Roland, 2001), bien qu'elle soit aussi impliquée dans le contrôle sensorimoteur (zone antérieure aIPS). La convergence tactile et visuelle dans l'aIPS est liée à la nécessité de reconnaître les aspects géométriques des formes pour la préparation de l'action motrice sur les objets (James, Culham, Humphrey, Milner, & Goodale, 2003), par exemple dans le cas où des mouvements sont guidés par la vue. La partie antérieure (aIPS) est aussi impliquée dans des tâches de rotation mentale tactile et visuelle (Patrow et al., 2004).

Les zones bimodales incluent une partie du complexe occipital latéral généralement activée par les stimuli visuels et tactiles (LOtv ; Amedi et al., 2001 ; Amedi et al., 2002). L'activité dans le LOtv est démontrée lors du traitement des propriétés spatiales de formes. Elle se distingue du traitement des propriétés matérielles et du traitement par d'autres modalités sensorielles (i.e., audition ; James et al., 2002 ; Prather et al., 2004). Le LOtv est occupé par l'aire 19 qui gouverne le cortex visuel associatif. Amedi et collaborateurs (2001) ont montré que cette zone n'était pas activée lorsque les participants devaient imaginer les objets. Dans une étude ultérieure (Amedi et al., 2002), cette zone n'a pas été activée par une tâche d'identification sonore des objets, alors qu'elle l'est lors de tâches visuelles et tactiles. Le LOtv serait donc surtout une zone convergente pour la description des structures spatiales d'objets.

³ Une lecture de Meredith (2002) et de Driver et Noesselt (2008) renseignera davantage sur la nature des convergences entre différentes modalités sensorielles (vision-audition ; vision-toucher ; etc.).

Le sillon occipito-pariétal est associé au traitement de l'orientation spatiale d'objets dans les deux modalités sensorielles (Zhang et al., 2004). Le cortex pariétal est, en plus, une zone convergente pour la réalisation d'une rotation mentale visuelle et tactile (Prather & Sathian, 2002 ; Röder et al., 1997). Un débat se poursuit pour savoir pourquoi le cortex pariétal est préférentiellement lié à l'imagerie mentale en rotation mentale tactile (James et al., 2006 ; Prather & Sathian, 2002). Entre autres, on peut s'interroger sur la nature de la convergence visuelle-tactile dans cette zone. L'activation du cortex pariétal suggère l'utilité des images visuelles lors du traitement d'informations tactiles (James et al., 2007 ; Lacey & Sathian, 2008 ; Sathian et al., 1997 ; Zhang et al., 2004).

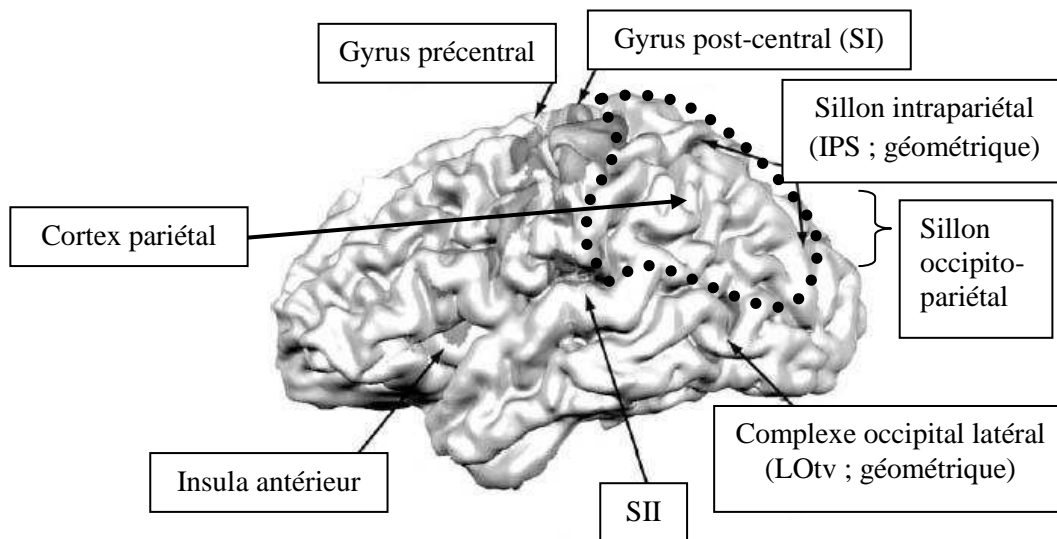


Figure 5. Zones corticales impliquées dans l'exploration tactile de formes (d'après James et al., 2007). Les zones IPS et LOtv participent activement à la reconnaissance des propriétés géométriques. Elles seraient des zones bimodales tactile-visuelle. Les zones SI, SII, Insula antérieure, et Gyrus précentral, participent à la reconnaissance des propriétés matérielles. Une dissociation des voies consacrées respectivement à la reconnaissance des propriétés géométriques et des propriétés matérielles aurait été estimée à la hauteur du Gyrus post-central (SI), selon la hiérarchie structurale tactile. Le cortex pariétal aurait été impliqué dans des tâches d'aptitudes spatiales nécessitant l'activation et la manipulation d'images mentales dans les deux modalités sensorielles.

3.2. *Priming ou influence de l'expérience tactile sur les zones visuelles activées*

James et collaborateurs (2002) ont utilisé le paradigme du priming intermodal pour étudier le substrat neurologique des représentations associées à la reconnaissance d'objets par la vue et par le toucher. Ils se sont intéressés aux transferts d'activations cérébrales d'une modalité sensorielle à l'autre. Lors de la période de familiarisation, des objets en argile non-familiers étaient présentés aux participants (perception 3D). Ces derniers

effectuaient plusieurs explorations (trois secondes par objets dans les deux modalités). Les chercheurs ont ensuite évalué les patrons d'activations cérébrales (Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, IRMf) pendant l'exploration des objets lors de la phase test.

En phase test, dans la condition visuelle, des objets déjà vus, déjà touchés ou des nouveaux objets étaient présentés aux participants sur un écran d'ordinateur. En condition tactile, l'exploration se faisait sur des nouveaux objets seulement. Les résultats obtenus montrent une activation plus importante pour les objets déjà étudiés (visuel ou tactile) comparée aux objets nouveaux, au niveau des zones occipitale latérale (LOC) et occipitale médiane (MO). Ainsi, la familiarisation tactile permet un priming perceptuel pour l'exploration visuelle, très similaire au priming visuel. Pour les objets non étudiés préalablement, les mêmes aires cérébrales ont été impliquées pour les deux modalités sensorielles : le circuit des aires visuelles habituellement lié à la voie neuro-anatomique ventrale (i.e., *Quoi ; représentation d'objets*). Ce résultat suggère un traitement similaire d'informations perceptuelles suite à une exploration tactile ou visuelle.

Amedi et al. (2002) ont montré que le LOC n'est pas nécessairement lié à l'imagerie mentale. Les résultats de James et al. (2002) suggèrent surtout une convergence visuelle et tactile au niveau du cerveau – pour la formation des représentations de formes. Cette étude montre un traitement d'objets non familiers similaire pour les deux modalités, par une activation commune des aires visuelles et un transfert implicite de l'expérience préalable tactile. Ces résultats correspondent à trois études comportementales ayant rapporté des transferts implicites entre les deux modalités sensorielles, d'importance égale selon les différentes directions d'échanges intermodaux (Easton et al., 1997a ; Easton et al., 1997b ; Reales & Ballesteros, 1999).

3.3. Activation du cortex visuel dans *une tâche d'orientation spatiale tactile*

La première démonstration de l'activation des aires visuelles, au cours d'une tâche tactile d'orientation spatiale a été faite par Sathian et collaborateurs (1997) au moyen de la Tomographie par émission de positrons, TEP. Dans leur étude, ils ont demandé à des participants de discriminer l'orientation de stimuli appliqués sur le bout de l'index droit immobile (Figure 6, p. 35). Ces derniers devaient définir l'orientation du stimulus par rapport à l'axe du doigt (i.e., vertical ou horizontal). Dans une tâche contrôle, les participants évaluaient une propriété matérielle (i.e., largeur des stries sur les stimuli) ne nécessitant pas de processus visuels. Le contraste entre la condition test et la condition

contrôle a démontré une activation sélective, pour la discrimination tactile, du cortex extrastrié, à proximité de la scissure occipito-pariétale. Cette zone avait été stimulée par TMS durant une tâche analogue visuelle (Sergent, Ohta, & MacDonald, 1992) et des tâches d'imagerie spatiale (Mellet, Tzourio, Crivello, Joliot, Denis, & Mazoyer, 1996).

Ainsi, Sathian et al. (1997) ont démontré des processus communs de traitement d'information spatiale entre la vision et le toucher (i.e., orientation spatiale). Ce résultat correspond au point de vue d'une organisation multi-sensorielle du cerveau, concernant la perception humaine (Jacobs, 1999 ; Pascual-Leone & Hamilton, 2001). Selon la thèse d'une organisation multi-sensorielle, certaines zones du cerveau peuvent participer au traitement d'informations parvenant de différentes modalités sensorielles. Ces zones seraient multi-sensorielles puisqu'elles activent des représentations indépendantes de la modalité sensorielle d'entrée (i.e., représentation multimodale).

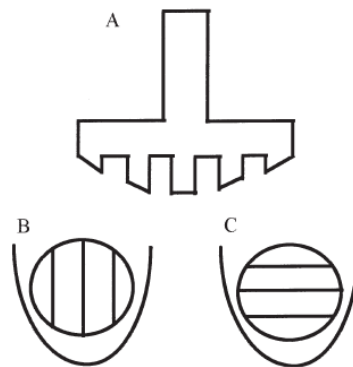


Figure 6. Reproduction des stimuli utilisés par Sathian et al., 1997. A) Vue transversale du stimulus appliqué sur la peau de l'index droit des participants avec différentes possibilités de rotation B) verticale et C) horizontale.

Des études plus récentes (Kitada et al., 2006 ; van Boven et al., 2005 ; Zhang et al., 2004), utilisant l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, IRMf, ont démontré des résultats très similaires à ceux de l'étude de Sathian et al. (1997). Lors d'une stimulation tactile, l'activité a encore été localisée dans les zones impliquant le traitement visuel (i.e., sillon post-central droit ; sillon intra-pariétal antérieur ; zone occipito-pariétale gauche). Par stimulation magnétique trans-crânienne (TMS), Zangaladze et al. (1999) ont induit des « lésions virtuelles » au niveau de la région occipito-pariétale, identifiée auparavant comme le locus de l'activation d'une zone « visuelle » en contexte de tâche tactile passive (Sathian et al., 1997). Suite à la présentation des stimuli, les lésions temporaires perturbaient seulement les comportements de réponse à la tâche spatiale, et

non à la tâche des propriétés matérielles. Ces résultats confirment la dissociation entre les processus impliqués dans le traitement de propriétés spatiales et dans le traitement de propriétés matérielles, pour la modalité tactile. Ils démontrent le rôle des aires visuelles en perception tactile en ce qui a trait à l'orientation spatiale des stimuli.

3.4. Activation du cortex visuel en rotation mentale tactile

Par électro-encéphalographie (EEG), Rösler et collaborateurs (1993) ont évalué les différences de potentiels évoqués produites au niveau de l'écorce cérébrale de participants effectuant une tâche de rotation mentale tactile. Leurs participants, tous droitiers, étaient divisés en trois groupes : un groupe de sujets voyants sous occlusion visuelle temporaire (i.e., bandeau), un groupe d'aveugles congénitaux et un groupe d'aveugles tardifs. La tâche des participants était de comparer des stimuli alphanumériques (i.e., chiffres et lettres), présentés successivement, selon quatre possibilités de disparités angulaires : 0° ; 60° ; 120° ; 180° . Les stimuli alphanumériques en relief étaient présentés sur des petites plaquettes (Figure 7). Lors de la première étape (5 secondes), les participants exploraient le modèle avec le bout de l'index droit. Dans une seconde étape, le stimulus de comparaison était exploré (7 secondes). A la dernière étape, la réponse du participant devait être émise dans la seconde suivant l'exploration du stimulus de comparaison.

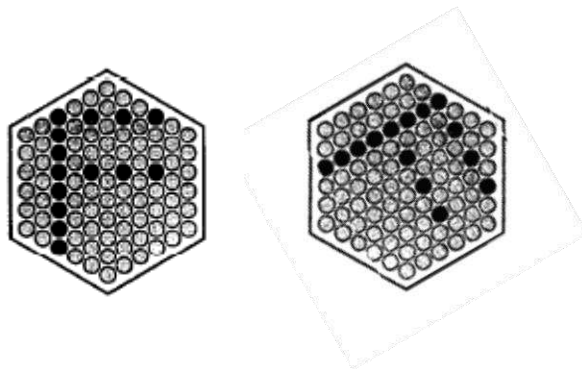


Figure 7. Stimuli identiques tirés de Rösler et al., 1993. Les stimuli illustrés ici présentent une disparité angulaire de 60° .

La topographie des potentiels évoqués, selon l'EEG, a montré un patron différent entre les sujets voyants et les aveugles. Lorsque les stimuli tactiles étaient encodés, les sujets voyants montraient une activation préférentielle du lobe frontal et pour les aveugles, une activation occipitale. Une incrémentation de l'amplitude des ondes lentes négatives a été interprétée par les auteurs comme étant liée à l'étape de la rotation mentale. Les auteurs ont noté une activation de la zone pariétale chez les sujets aveugles et voyants, durant la

rotation mentale. Les résultats seraient comparables aux résultats d'études de la rotation mentale visuelle, montrant l'implication du cortex pariétal (Prather & Sathian, 2002). Les auteurs ont aussi montré une augmentation monotone de l'activité dans la zone pariétale, avec l'augmentation des disparités angulaires. Ce résultat permet de confirmer une augmentation de l'activité pariétale, associée à une rotation mentale plus importante lors de l'augmentation des disparités angulaires entre deux objets (voir aussi Röder et al., 1997). Le cortex occipital, habituellement impliqué dans le traitement visuel, serait aussi activé durant la tâche tactile, et spécifiquement au cours de l'étape de rotation mentale. Chez les aveugles, la rotation mentale aurait démontré les mêmes patrons d'activation. La zone pariétale est donc activée indépendamment de la modalité sensorielle, et indépendamment de l'expérience visuelle préalable. Elle serait une zone convergente, coactive, pour la représentation mentale ou la rotation mentale visuelle et tactile.

3.5. Résumé (sections 2 et 3)

Les études précédentes ont permis d'observer plusieurs points de convergence entre les systèmes de traitement d'informations visuelle et tactile. On note pour chacune des modalités sensorielles des modes de perception actifs, particulièrement efficaces pour la prise d'informations spatiales de formes géométriques et pour la catégorisation et la reconnaissance d'objets. La supériorité de la modalité visuelle n'est pas reconnue par tous les chercheurs en psychologie cognitive. Certains se questionnent néanmoins sur l'indépendance du traitement tactile, vis-à-vis de l'expérience visuelle, particulièrement dans des tâches nécessitant le traitement d'informations spatiales de formes. Pour la reconnaissance de formes d'objets, des zones cérébrales traditionnellement associées au traitement visuel seraient actives durant le traitement tactile. Ainsi, des études ont démontré une activation de zones bimodales, traditionnellement liées au traitement visuel, lors d'un traitement tactile. Entre autres, ces études démontrent la possibilité d'un priming tactile pour le traitement visuel, d'un traitement visuel des orientations spatiales tactiles et d'un traitement visuel en rotation mentale tactile. Ces études permettent de prédire une forme de dépendance ou de correspondance visuelle dans le traitement tactile, lors de tâches d'imagerie mentale ou de rotation mentale. En revanche, les études chez les aveugles peuvent aussi démontrer une indépendance sensorielle en rotation mentale, et/ou une dépendance non visuelle.

4. Tâches de rotation mentale et problématique

4.1. Présentation du Test des Rotations Mentales (Vandenberg & Kuse, 1978)

Les études en psychologie cognitive se sont le plus souvent intéressées au traitement visuel des informations spatiales. Or, il existe une forte relation entre les tests spatiaux-visuels et des tâches tactiles complexes (voir Roberts, Stankov, Pallier, & Dolph, 1997 ; Stankov et al., 2001). Par exemple, Stankov et collaborateurs (2001) ont démontré, par analyse factorielle confirmatoire, un facteur explicatif commun des performances impliquant les processus de traitement spatial tactiles, la « visualisation » mentale et l'intelligence fluide. Néanmoins, on note dans la littérature une relative absence de tests tactiles (voir Carroll, 1993). Très peu d'études psychométriques existent à leur sujet, bien que les mécanismes du toucher puissent offrir un contexte d'étude intéressant des différences interindividuelles, chez des populations de voyants et d'aveugles. La majorité des discussions sur l'imagerie mentale a aussi favorisé la modalité visuelle. Or, les représentations tactiles sont tout aussi importantes d'un point de vue psychologique.

Le MRT visuel est un test d'intelligence visuo-spatiale (Vandenberg & Kuse, 1978). On le considère comme une mesure générale de l'aptitude spatiale de rotation mentale (Peters, Laeng, Latham, Jackson, Saiyouna, & Richardson, 1995 ; Shiina, Saito, Suzuki, 1997 ; Vandenberg & Kuse, 1978 ; sauf voir Caissie, Vigneau, & Bors, 2009, voir Annexes). La version redessinée du MRT est constituée de 24 items (Peters et al., 1995), illustrant chacun 5 objets tridimensionnels, alignés à l'horizontal. Ces objets sont des répliques des objets originaux utilisés dans l'étude de Shepard et Metzler (1971) sur la rotation mentale (cf. section 1 ; Figure 2, p. 19). Un objet modèle est situé à gauche de quatre choix de réponse (Figure 8, p. 40). L'objectif du participant est de trouver pour chaque item les deux objets identiques au modèle, placés dans différentes orientations. Les objets sont positionnés selon des orientations spatiales différentes, pouvant varier selon trois axes (x, y, z), de 0° à 180° (Caissie, 2010). Les participants doivent habituellement résoudre un maximum d'items dans un temps autorisé de dix minutes.

Traditionnellement, le Test des Rotations Mentales (MRT, Vandenberg & Kuse, 1978) mesure les aptitudes spatiales des individus en se basant sur le prélèvement d'informations visuelles. Peu d'informations sont disponibles toutefois concernant la mesure tactile du MRT. Une seule étude (Robert & Chevrier, 2003) a démontré des temps

de réponse tactile plus longs que les temps de réponse visuelle. L'exploration tactile a aussi donné des scores de précision plus faibles que les scores de précision visuels. Toutefois, dans l'étude de Robert et Chevrier (2003), l'analyse a été menée uniquement selon un design d'analyse inter-sujet, pour une comparaison des performances visuelle et tactile de groupes de participants différents. Une limite de cette étude est liée à l'impossibilité d'évaluer plus proprement les facteurs de la difficulté rencontrée dans les deux modalités sensorielles, ainsi que la similarité/dissimilarité des processus de traitement visuel et tactile (cf. section 4.3. : Transferts intermodaux au MRT).

Dans notre étude, nous procéderons à une comparaison entre performances visuelles et tactiles, en utilisant une version courte visuelle du MRT et une réplique tactile de celle-ci. Nous pouvons attendre une supériorité visuelle, démontrée par des temps de réponse visuels plus rapides et des scores de précision visuels plus élevés. Or, en plus d'une vérification des résultats rapportés par Robert et Chevrier (2003), nous évaluerons l'apport de différentes caractéristiques visuelles des items du MRT à la difficulté du test et nous évaluerons pour la première fois la possibilité de généraliser les facteurs de la difficulté visuelle au MRT tactile. Les facteurs de difficulté au MRT sont-ils les mêmes, indépendamment de la modalité sensorielle utilisée ? Une description des différentes caractéristiques d'items, intégrant le MRT, est exposée à la section suivante (4.2.). Tel qu'exposé ensuite à la section 4.3., nous évaluerons la similarité/dissimilarité des processus de traitement visuel et tactile ainsi que les transferts intermodaux, par un design d'analyse intra-sujet.

4.2. *Caractéristiques d'items et modèles de difficulté du MRT*

Des études récentes (Caissie, Vigneau, & Bors, 2009 ; Vigneau, Caissie, & Bors, sous presse ; Voyer, Rodgers, & McCormick, 2004) ont évalué la contribution de quelques caractéristiques d'items (décrites plus bas) à la difficulté générale du MRT visuel et aux différences interindividuelles de performance. Notamment, une analyse générale de la difficulté démontre que certains items du MRT sont plus difficiles que d'autres (Voyer et al., 2004) et que seuls les items difficiles peuvent nécessiter des processus de rotation mentale (Shiina & Suzuki, 1999), tout en permettant de différencier les « bons imageurs » des « faibles imageurs » (Geiser, Lehmann, & Eid, 2006).

Dans une étude récente, menée en parallèle de mon travail de thèse (Caissie et al., 2009), mes collègues et moi avons proposé de distinguer trois facteurs de difficulté

principaux, définis selon différentes caractéristiques d'items : présence ou non d'occlusion visuelle, présence ou non de distracteurs « miroirs », présence ou non de configurations géométriques homogènes (Figure 8 A, B, et C, p. 40). Il apparaît alors que les items avec occlusion visuelle sont plus difficiles que les items sans occlusion visuelle, les items miroirs sont plus difficiles que les items structuraux, et les items homogènes sont plus difficiles que les items hétérogènes. L'apport des caractéristiques d'items à la difficulté du MRT a permis de développer des modèles, selon lesquels nous pouvons évaluer les similarités/dissimilarités de traitement d'informations spatiales entre la vue et le toucher.

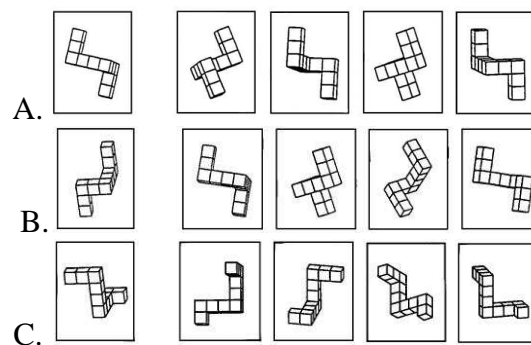


Figure 8. Exemples d'items du MRT (d'après Vigneau et al., sous presse). Pour chaque item, le participant doit trouver, parmi quatre choix de réponse à droite, deux objets identiques au modèle, situé à gauche. Les items A et B présentent une occlusion visuelle (choix 3 et 2, respectivement), l'item C est sans occlusion visuelle ; les items A et B sont des items miroir (les mauvaises réponses sont des reproductions miroir du modèle), l'item C est un item structural (les mauvaises réponses sont autre chose que l'image miroir du modèle) ; les items A et B sont homogènes (les segments des extrémités terminales d'objets sont de longueur égale : 3 cubes), l'item C est hétérogène (les segments des extrémités terminales d'objets sont inégaux : 3 cubes constituent l'extrémité du haut vs. 2 cubes constituent l'extrémité du bas).

Les items structuraux nécessitent le recours à des processus d'identification des structures locales d'objets ou distracteurs (Caissie et al., 2009 ; Voyer & Hou, 2006 ; Voyer et al., 2004). La distinction des structures, suite à la comparaison des objets modèles et distracteurs, ne dépend pas d'une rotation mentale (Caissie et al., 2009 ; Shiina & Suzuki, 1999). A la Figure 8C, la différence entre le segment de l'extrémité terminale inférieure du premier choix de réponse et de l'extrémité inférieure du modèle est rapidement perçue par la vue. En modalité tactile, un suivi des contours permet aussi de comprendre les différences de structures (Lakatos & Marks, 1999). Dans ce cas, les participants peuvent procéder par élimination des distracteurs (Bethell-Fox et al., 1984 ; Geiser, Lehmann & Eid, 2006 ; Shiina & Suzuki, 1999). Au contraire, les items miroir, avec distracteurs inversés, nécessitent davantage d'explorations globales des formes d'objets, et une rotation mentale imagée pour réaligner les objets similaires en position

congruente avec le modèle (Shiina & Suzuki, 1999 ; Voyer et al., 2004 ; Voyer & Hou, 2006).

Tous les objets du MRT peuvent être représentés selon deux types de configurations : homogènes versus hétérogènes. Les objets à configurations homogènes et hétérogènes sont constitués chacun du même nombre de cubes. Toutefois, alors que les segments des extrémités terminales des objets homogènes sont constitués d'un nombre égal de cubes (trois), les segments des extrémités terminales des objets hétérogènes comportent un nombre inégal de cubes (trois pour le segment terminal supérieur, deux pour le segment terminal inférieur) (Vigneau et al., sous presse). L'hétérogénéité des objets permet une meilleure discrimination (Caissie et al., 2009). Par ailleurs, les objets homogènes présentent une symétrie interne, alors que les objets hétérogènes présentent une asymétrie interne. Au toucher, la détection de l'asymétrie d'objets serait plus rapide et plus exacte (vs. symétrie), pouvant permettre une représentation tactile plus rapide des objets hétérogènes (Ballesteros et al., 1997 ; Locher & Simmons, 1978 ; Simmons & Locher, 1979).

Selon Voyer et Hou (2006), la caractéristique visuelle d'occlusion dans les items du MRT rend plus difficile la perception unifiée des objets. L'orientation des objets serait en cause : un objet désorienté du point de vue d'un observateur rend hors de portée certaines informations de formes visuelles. Une partie de l'objet doit être reconstituée mentalement sur la base de ses éléments visibles. Cette difficulté est spécifique à la modalité visuelle. En modalité tactile, la main rend disponible les éléments non visibles des objets par la procédure exploratoire d'enveloppement (Lederman & Klatzky, 1987 ; Woods, O'Modhain & Newell, 2004 ; Woods & Newell, 2004).

Pour un item donné, les caractéristiques décrites dans la littérature ne sont pas représentées de façon exclusive (Tableau 2, p. 42). Par exemple, les items avec occlusion significative sont aussi homogènes et miroir. La difficulté des items peut ainsi dépendre d'une caractéristique spécifique ou d'un amalgame des caractéristiques. Une cohérence visuelle-tactile des modèles, telle qu'observée dans les études d'échelonnement multidimensionnel (cf. section 2.6. ; Garbin, 1990 ; Garbin & Bernstein, 1984), pourrait suggérer une équivalence des représentations et un traitement cognitif similaire, suite à une exploration tactile ou visuelle (i.e., manipulation des représentations).

Tableau 2. Catégorisation des caractéristiques d'items du MRT selon Voyer et Hou (2006), Caissie et al. (2009), pour les items utilisés dans cette étude.

Items	Occlusion*	Type de Distracteur**	Configuration***
1	NO	M	HETER
2	NO	M	HETER
3	NO	S	HETER
4	NO	S	HETER
5	NO	M	HETER
6	NO	M	HETER
7	NO	S	HETER
8	NO	S	HETER
9	O	M	HOMOG
10	O	M	HOMOG
11	O	M	HOMOG
12	NO	M	HETER
13	NO	S	HOMOG
14	O	S	HOMOG

Note : *NO=non-occlus ; O=occlus ; **M=miroir ; S=structural ; ***HETER=hétérogène ; HOMOG=homogène.

Une autre possibilité est que l'exploration par les deux modalités produit des résultats similaires, la cause des erreurs n'étant pas nécessairement due aux mêmes facteurs ou caractéristiques (Ellis & Lederman, 1993 ; Heller, 2000 ; Heller & Joyner, 1993). Nous savons que plusieurs stratégies (i.e., visuelles, spatiales ; Farah et al., 1988) peuvent être utilisées pour réaliser la tâche (Fitzhugh, Shipley, Newcombe, & Dumay, 2008 ; Geiser et al., 2006). La comparaison et la reconnaissance d'objets désorientés ne sont pas nécessairement dépendantes d'une rotation mentale imagée visuelle (Farah et al., 1988 ; Kozhenikov et al., 2005). Pour le MRT, les différents modèles prédisent que la difficulté peut-être expliquée par les caractéristiques d'items, autant durant l'exploration tactile que durant l'exploration visuelle.

4.3. Transferts intermodaux au MRT

Aucune recherche n'a évalué la question de l'équivalence perceptuelle par une étude des transferts intermodaux au MRT, dans un design d'analyse intra-sujet. Or, placer les participants dans deux conditions sensorielles successives, similaires ou non, est approprié pour évaluer les effets d'une expérience sensorielle spécifique préalable (session 1 : visuelle ou tactile) sur les performances ultérieures (session 2 : visuelle ou tactile). Une seule répétition de ce test en condition visuelle a montré une amélioration substantielle des performances (Casey & Brabeck, 1989 ; Peters et al., 1995). Cette amélioration est liée à un apprentissage perceptuel implicite (Heil et al., 1998). Nous pouvons évaluer à la fois les

performances ainsi que les transferts par l'étude des variables des pourcentages corrects obtenus en général (et par items) et des temps de réponse en général (et par items).

Comme déjà décrit (cf. section 1.6.), le transfert est une mesure de l'information pouvant être utilisée par une modalité sensorielle, suite à un changement des modalités sensorielles (Streri, 2000). Des représentations similaires permettraient un transfert d'information entre les deux modalités sensorielles. Ainsi, une expérience sensorielle préalable pourrait servir de priming permettant une représentation stable d'objets, malgré un changement des modalités sensorielles (Cattaneo & Vecchi, 2008 ; Lacey & Campbell, 2006 ; Reales & Ballesteros, 1999 ; Woods & Newell, 2004). En utilisant le paradigme de transferts intermodaux, nous pourrions évaluer l'effet d'une expérience sensorielle préalable et la question de la généralisation de l'apprentissage perceptuel en condition intermodale (Behrmann & Ewell, 2003), tout en évaluant les similarités ou spécificités de traitement visuel et tactile au MRT en général, et par items.

4.4. Rotation mentale, pente, intercept, et différences stratégiques

Dans une tâche de rotation mentale, les participants doivent décider, pour plusieurs présentations de paires, si deux objets placés dans différentes orientations sont identiques ou différents (Shepard & Metzler, 1971 ; cf. section 1.7.). Les tâches sollicitant un processus central de rotation mentale visuelle requièrent quelques secondes d'effort soutenu à chaque présentation de paires. Tel que décrit par Parsons (2003), l'émission d'une réponse nécessite 5 stades majeurs de traitement plus ou moins séquentiels : (1) représentation perceptuelle des stimuli ; (2) analyse perceptuelle de la différence d'orientation entre l'objet de comparaison et l'objet modèle permettant de planifier la rotation mentale ; (3) imaginer la rotation jusqu'à ce que l'orientation de l'objet de comparaison soit au plus près de celle de l'objet modèle, permettant de juger de la similarité ou de la différence entre les objets ; (4) comparaison et vérification des images d'objets pour établir le jugement ; (5) confirmation et émission de la réponse. Le temps de réponse se divise ainsi en différents stades, impliquant l'imagerie mentale (stades 3 et 4) et des processus de traitement « perceptifs » (stades 1, 2, et 5). Ainsi, la rotation mentale est seulement une étape du traitement des informations (Corballis, 1988 ; Parsons, 2003).

Généralement, les temps de réponse augmentent avec l'augmentation des disparités angulaires (α) entre les objets (Figure 9, p. 44), définissant une relation linéaire. L'efficacité de la rotation mentale est alors illustrée par l'élévation de la pente de la

relation linéaire (Dror & Kosslyn, 1994), indépendamment d'une variation de l'intercept. Ces deux valeurs sont importantes pour une description de la chronométrie mentale liée à la rotation mentale (Cohen & Blair, 1998). La pente est généralement définie comme « la vitesse de la rotation imaginée » (Cohen & Blair, 1998 ; Metzler & Shepard, 1974 ; Shepard & Cooper, 1973), alors que l'intercept définit la vitesse des « processus de recherche perceptuelle et de confirmation », liés à l'encodage des formes d'objets, à la comparaison des objets, et à la programmation des réponses (Shepard & Metzler, 1988). Dans notre étude, nous subdiviserons l'analyse pour évaluer de façon contrôlée les transferts des traitements cognitifs liés à la rotation mentale (pente), ainsi qu'au traitement d'encodage (intercept).

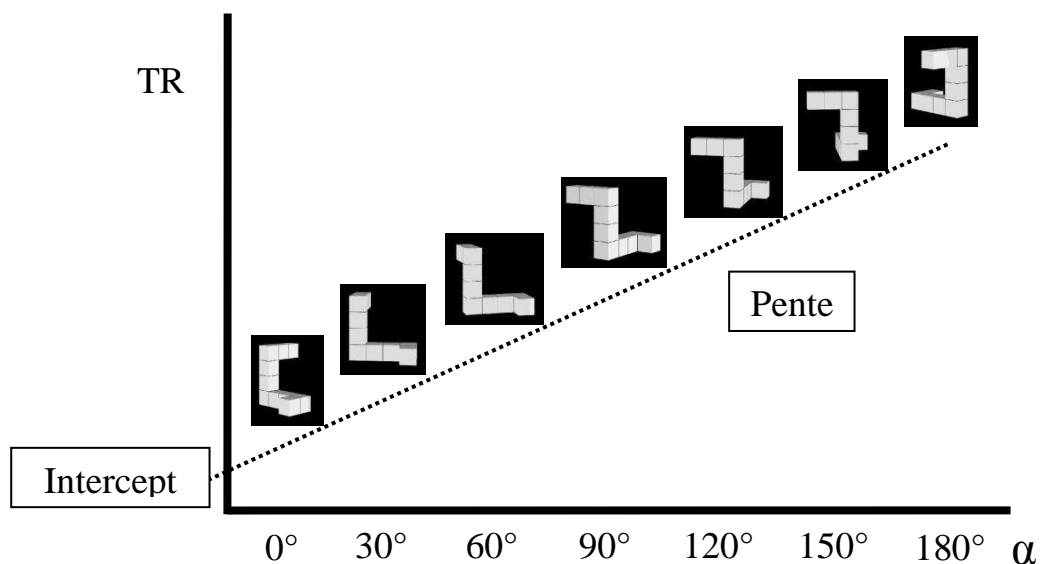


Figure 9. Fonction linéaire entre les temps de réponse (TR) et le degré de disparité angulaire (α).

Selon Egan (1978), les temps de réponse (ou la vitesse du traitement de l'information) définissent le mieux l'aptitude spatiale d'un individu. Les mesures de réussite (pourcentage de réponses correctes) et les temps moyens de réponses peuvent définir des opérations liées à des processus cognitifs indépendants (Dror & Kosslyn, 1994). Egan (1978) émet l'hypothèse que la réussite (%) définit l'aptitude du participant à coder et à représenter les informations des stimuli (i.e., forme), alors que les temps de réponses définissent l'aptitude de manipulation des codes ou des informations. L'étude des transferts intermodaux, sur les pourcentages de réponses correctes, les temps de réponses ainsi que sur les valeurs de pente et d'intercept, permettrait d'évaluer la similarité/ la dissimilarité

perceptuelle et représentationnelle du traitement d'information lors de tâches de rotation mentale visuelles et tactiles.

Pour évaluer les différences stratégiques d'encodage adoptées, nous pouvons aussi développer des définitions de ce que les participants font durant les tâches (i.e., patrons de mouvements oculaires vs. patrons d'inspection tactile). Les participants lors des tâches donnent probablement plus d'importance à l'exploration de certaines parties des objets (i.e., haut vs. bas ; Rock, 1973). Le mode d'inspection change avec l'expérience perceptuelle ou l'apprentissage perceptuel (i.e., Gibson, 1953 ; Goldstone, 1998 ; Pailhous, 1970 ; Richard, Vas-Cerniglia, & Portalier, 2004 ; Yarbus, 1967). Une possibilité serait que les participants adaptent leurs stratégies selon l'expérience préalable (visuelle ou tactile) ou les informations stockées en mémoire. Ainsi, une autre façon d'évaluer les transferts implicites entre modalités sensorielles serait d'évaluer leurs influences sur la prise d'information. Il est possible qu'une expérience préalable spécifique (visuelle ou tactile) influence implicitement la prise des informations lors d'une tâche subséquente.

– DEUXIEME PARTIE –

PARTIE EXPERIMENTALE

ETUDE 1 : Etude des transferts intermodaux lors de tâches de rotation mentale. Spécificité tactile, indépendance sensorielle ou dépendance visuelle ?

1.1. Introduction générale (Expériences 1 et 2)

La nature des représentations mentales suscite de vives discussions en psychologie cognitive (Anderson & Bower, 1973 ; Kosslyn et al., 2006 ; Pearson et al., 1999 ; Pylyshyn, 2003a). De même, la relation entre traitements cognitifs, suite à l'exploration visuelle et tactile, est encore mal définie. De ce fait, cette étude vise à évaluer les points de convergence ou de divergence entre la vue et le toucher dans le traitement des informations spatiales, lors de tâches de rotation mentale. Elle vise ainsi à mieux comprendre les similarités ou dissimilarités entre représentations visuelles et tactiles au moyen d'un paradigme de transferts intermodaux.

Dans l'Expérience 1a, l'objectif est de comparer les transferts intermodaux et intramodaux en utilisant le Test des Rotations Mentales de Vandenberg et Kuse (MRT ; 1978). Une différence de traitement (scores de précision et temps de réponse) serait suggérée par l'inégalité entre transferts intermodaux et intramodaux. Dans l'Expérience 1b, l'objectif est de mener une analyse psychométrique de la tâche tactile et de la tâche visuelle à partir des données de la première session de l'Expérience 1a. Les analyses permettront d'évaluer la généralité des modèles de difficulté (cf. section 4.2.) développés récemment pour le MRT visuel (Caissie et al., 2009 ; Voyer & Hou, 2006). L'équivalence des modèles visuel et tactile serait une indication de mesures similaires des caractéristiques d'items. Une convergence des erreurs systématiques irait dans le sens de l'hypothèse des descriptions structurales similaires de formes géométriques pour les deux modalités sensorielles (Ballesteros, 2008 ; Lacey & Sathian, 2007 ; Reales & Ballesteros, 1999). Dans l'Expérience 1c, l'étude des transferts est reprise sur deux composantes des modèles distracteurs (miroir vs. structural) et occlusion-configuration (homogène vs. hétérogène). Les analyses de cette section reproduisent en partie l'analyse de l'Expérience 1a, tout en spécifiant les transferts sur les différentes composantes d'items. Une différence de traitement serait encore suggérée par l'inégalité entre transferts intermodaux et intramodaux par composantes. L'effet modulateur de la difficulté des items sur les transferts sera ainsi évalué.

Dans l'Expérience 2a, l'étude des transferts est examinée dans une tâche classique de rotation mentale (Shepard & Metzler, 1971). L'intérêt de cette tâche de rotation mentale

est qu'elle permet d'étudier l'effet des modalités sensorielles sur les valeurs de pentes (i.e., « la vitesse de la rotation imaginée ») et d'intercept (i.e., « vitesse des processus d'encodage, de recherche perceptuelle et de confirmation »). Nous pourrions examiner l'hypothèse d'une similarité/dissimilarité fonctionnelle entre rotation mentale visuelle et rotation mentale tactile. Dans l'Expérience 2b, l'étude des transferts est reprise pour comparer la prise des informations par la modalité tactile et la modalité visuelle sur les données des mouvements oculaires et des séquences d'inspections tactiles, répertoriées suite à l'Expérience 2a. Les différences des patrons d'inspections tactile et visuel seront évaluées. L'étude des transferts permettra d'évaluer les effets d'une expérience sensorielle préalable (visuelle vs. tactile) sur les stratégies de résolution des tâches visuelle et tactile, respectivement.

1.2. EXPERIENCE 1a : Les aptitudes spatiales mesurées par le Test des Rotations Mentales dépendent-elles d'une expérience sensorielle spécifique ?

Le Test des Rotations Mentales (MRT, Vandenberg & Kuse, 1978) mesure les aptitudes spatiales des individus en se basant sur le prélèvement d'informations visuelles. Comme déjà mentionné, peu d'informations sont disponibles concernant la mesure tactile du Test des Rotations Mentales. La comparaison des performances de groupes distincts (plan expérimental inter-sujets), réalisant soit le MRT visuel, soit le MRT tactile (Robert & Chevrier, 2003), a permis de constater que les temps de réponses sont plus longs et les scores de précision plus faibles au MRT tactile qu'au MRT visuel. Dans le cadre de notre étude, la comparaison des performances au MRT visuel et au MRT tactile se fera selon un plan expérimental intra-sujets. Les participants réaliseront le MRT dans deux conditions successives, bénéficiant uniquement soit des informations visuelles, soit des informations tactiles. Ce plan expérimental a comme avantage de permettre d'examiner les effets d'une expérience sensorielle spécifique sur la performance ultérieure des participants (transfert intramodal vs. transfert intermodal)⁴.

Les résultats liés aux effets d'une expérience sensorielle spécifique sur la rotation mentale visuelle et tactile ont différentes implications théoriques. Une asymétrie des transferts intermodaux et intramodaux permettra de démontrer un traitement différencié des informations issues des récepteurs tactiles et des récepteurs visuels. Les transferts intermodaux ne seraient pas observés dans toutes les conditions (Behrmann & Ewell, 2003 ; Hatwell, 2000b), ou seraient négligeables comparativement aux transferts intramodaux. Si l'amélioration des performances est seulement observée pour les conditions intramodales, il sera alors raisonnable de conclure que la rotation mentale implique des processus dépendants de la modalité sensorielle utilisée (i.e., aucun lien entre la modalité visuelle et tactile). Au contraire, une amélioration équivalente dans toutes conditions suggérera des processus indépendants d'une modalité ou l'autre (i.e., traitement multisensoriel).

Compte tenu des données de la littérature, une supériorité visuelle est attendue dans le cas où les aptitudes spatiales dépendent fortement de la vue. Le postulat d'une dominance visuelle en aptitudes spatiales a été soutenu par différents chercheurs (Millar, 1975 ; Millar & Al-Attar, 2005 ; Rock & Victor, 1964 ; Thinus-Blanc & Gaunet, 1997).

⁴ Les données rapportées dans cette expérience font l'objet d'une publication : Toussaint, L., Caissie, A., & Blandin, Y. (2012). Does spatial ability depend on sensory-specific experience? *Journal of Cognitive Psychology*. doi: 10.1080/20445911.2011.641529.

Une dominance visuelle peut être démontrée par de meilleurs scores de précision visuels et des temps de réponses visuels plus courts, comparés aux performances en tâche tactile. Dans notre étude, une amélioration dans la condition intermodale pour la tâche tactile seulement suggérera une influence importante de l'expérience visuelle sur les aptitudes de rotation mentale tactile (i.e., groupe visuel-tactile). Par contre, il n'y a aucune raison théorique d'attendre seulement une amélioration tactile dans la condition intermodale (i.e., amélioration du groupe tactile-visuel attendue).

1.2.1. Méthode :

Quatre-vingt treize⁵ adultes droitiers (47 femmes et 46 hommes ; âge moyen = 24.2 ± 4.2 ans) ont participé volontairement à cette expérience. Tous ont rapporté avoir une vision normale ou normale-correctée, et aucune perte sensorielle tactile. Chaque participant a signé un formulaire de consentement avant de débiter l'expérience.

a) Tâches et dispositif expérimental :

Les items 1 à 14 du MRT (Vandenberg & Kuse, 1978 ; version améliorée de Peters et al., 1995) ont été utilisés (voir Annexes de thèse). Chaque item présente 5 objets, dont un modèle et quatre choix de réponse. Les choix de réponse sont deux reproductions parfaites du modèle et deux distracteurs, différents du modèle. Pour tous les items, les participants doivent trouver parmi les choix de réponse les deux objets identiques à la figure modèle, modulo une rotation angulaire.

Dans la condition visuelle (V), les items étaient présentés individuellement sur un écran interactif Cintiq_{18SX} placé approximativement à 40 cm des yeux des participants (écran SVGA, 42 cm) et incliné de 30 degrés par rapport à la verticale. Le système Eyelink II® (©2002a, ©2002b, SR Research Ltd., Mississauga, ON) a été utilisé pour enregistrer et analyser les mouvements oculaires des participants, nécessaires pour déterminer le temps d'inspection des objets avant l'émission des choix de réponses. Pour tous les items, les participants encerclaient directement sur écran leurs deux choix de réponse en utilisant un stylo digital. La Figure 10 illustre deux items visuels (p. 50). Le contexte de la tâche visuelle est illustré à la Figure 11 (p. 51). Pour la condition tactile (T), des items en bois

⁵Les 93 participants sélectionnés pour les analyses ont obtenu au moins 35% de bonnes réponses (5 items réussis), à chacune des sessions, sans expérience préalable ou avec expérience préalable.

ont été construits, reproduisant le plus fidèlement possible les 14 items informatisés de la condition visuelle, en ce qui a trait à la taille, l'orientation et la configuration géométrique des objets. Les cinq objets étaient positionnés à l'horizontal, le modèle à gauche et les quatre choix de réponse à droite. Les objets reproduits, composés chacun de dix cubes de bois⁶ (0,9 cm³), étaient fixés sur des tiges métalliques (longueur ~ 6 cm ; diamètre = 0.3 cm) et alignés sur une planche (voir item 12, Figure 12, p. 51).

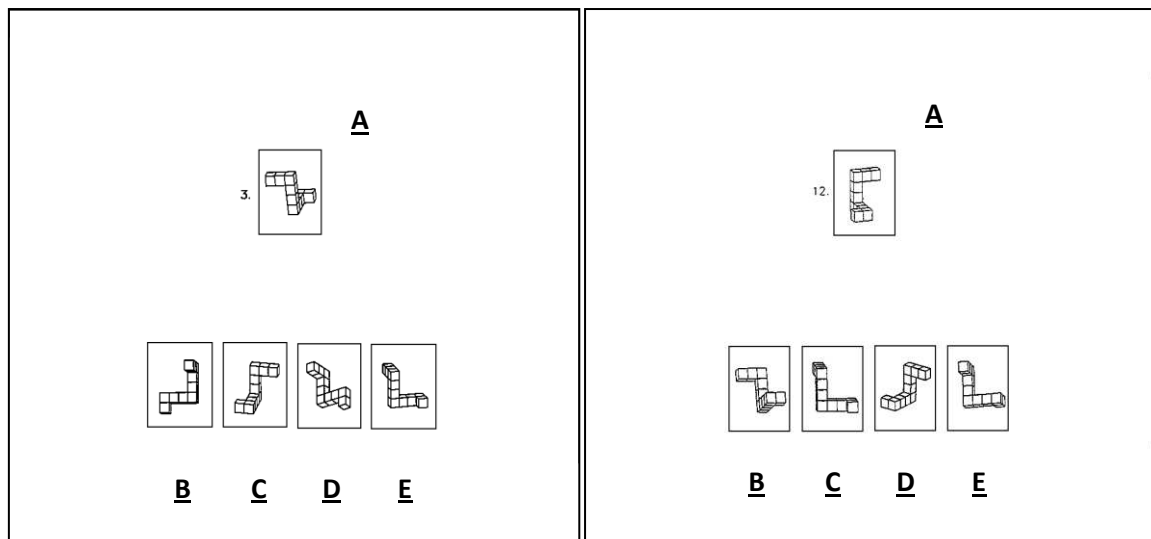


Figure 10. Illustration de deux items visuels du MRT. Chaque item est composé d'un modèle (A) et de quatre choix de réponse (B, C, D, E). Les réponses correctes de l'item 3 sont C et E ; les distracteurs à configuration structurale différente sont B et D. Les réponses correctes de l'item 12 sont C et D ; les distracteurs à configurations miroir sont B et E.

⁶La texture des objets, au toucher, donne l'impression de reliures entre les cubes et reproduit en partie l'impression visuelle en rapport à la constitution interne des objets.



Figure 11. Illustration du contexte de la tâche visuelle avec mesure des mouvements oculaires. Les participants encerclaient sur écran leurs deux choix de réponse en utilisant un stylo digital, avant de cocher une case en bas à droite de l'écran pour passer à l'écran intermédiaire de calibration de mesure. La calibration inter-item consistait en un exercice simple de fixation d'un point central à l'écran. L'expérimentateur était assis, deux mètres derrière les participants, face à l'ordinateur maître Eyelink II® (©2002a). Il assurait la calibration et l'amorçage des items subséquents.

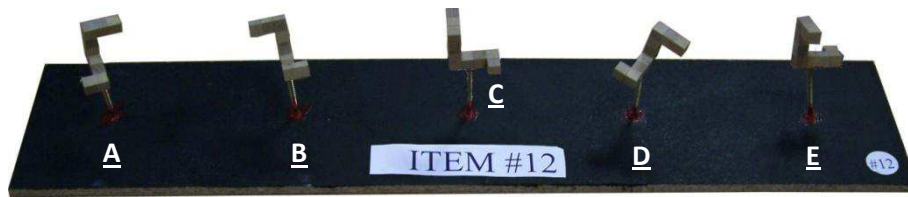


Figure 12. Item 12 de la tâche tactile, sur planche (65 cm x 13 cm). Chaque item est composé d'un modèle (A) et de quatre choix de réponse (B, C, D, E). Les réponses correctes de l'item 12 sont C et D ; les distracteurs à configuration miroir sont B et E.

Le dispositif expérimental (Figure 13 A, B, C, p. 52) a été spécialement conçu pour l'administration de tous les items tactiles en contexte d'occlusion visuelle (écran opaque placé entre les items et le participant). L'espace de travail des participants favorisait l'exploration tactile sans contraintes. Pour tous les items, les participants devaient toucher les objets (avec la main droite) et donner deux réponses en appuyant sur les boutons correspondant à leurs choix de réponse. L'expérimentateur assurait les changements de planches d'items et la gestion de l'équipement de mesure. Dès que les participants terminaient l'analyse d'une planche (par émission des deux réponses), l'expérimentateur faisait glisser une nouvelle planche dans le dispositif pour le début de l'item subséquent. Une caméra digitale positionnée au dessus du dispositif filmait la main droite des

participants sur les objets et permettait d'enregistrer les réponses émises (voir description plus bas, section d).

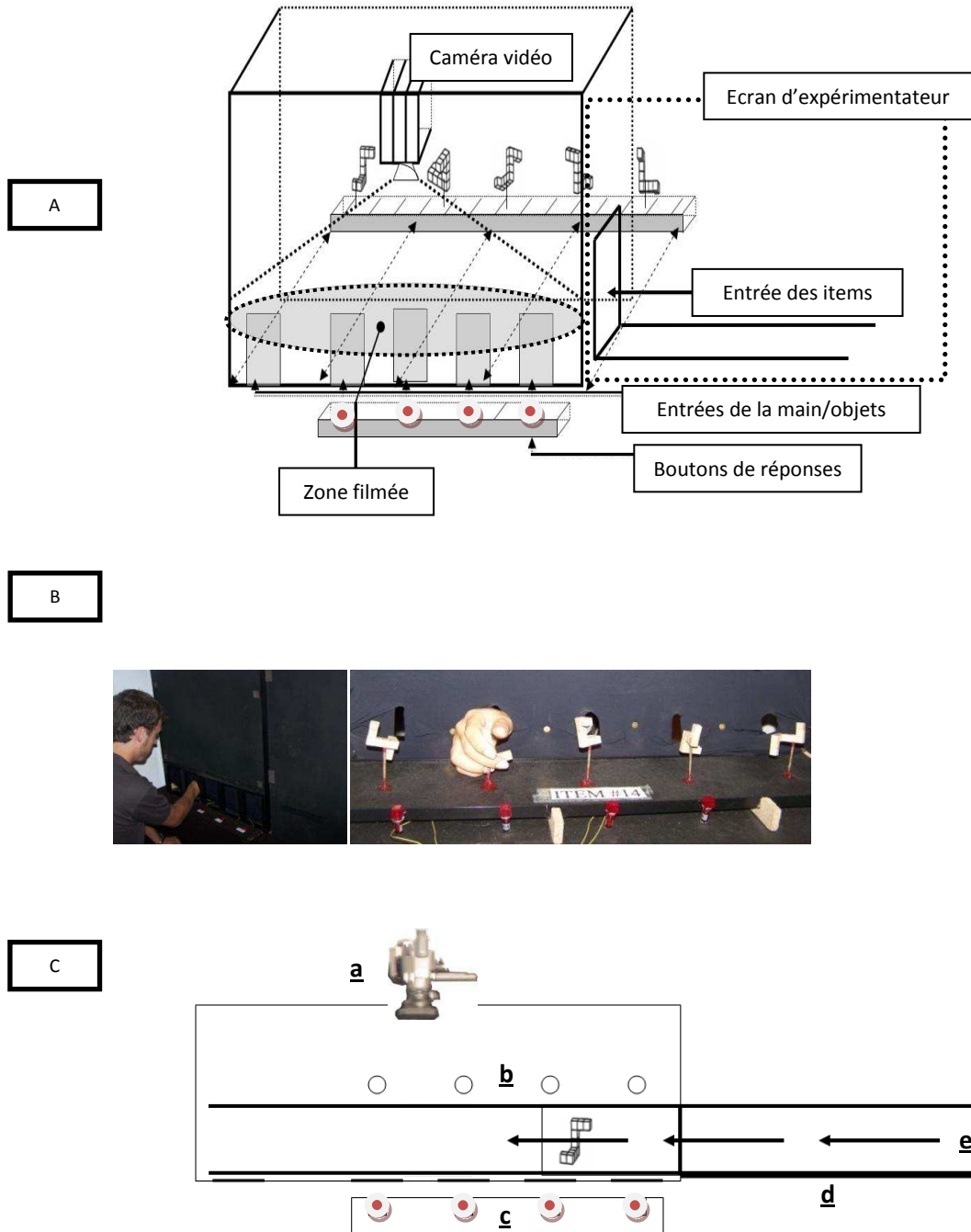


Figure 13. Dispositif expérimental de la tâche tactile. 3A : Une boîte (68 cm x 68 cm x 30 cm) munie de cases d'entrée main/objets à l'avant et d'une case d'entrée/sortie des items sur le côté droit. Les participants étaient assis devant le dispositif et l'expérimentateur était positionné derrière (68 cm x 68 cm). 3B : Contexte de tâche. Avec la main droite, les participants touchaient les objets. Les boutons de réponse activaient les lumières correspondant aux réponses émises. 3C : Plan du dispositif expérimental, vue de haut. Caméra vidéo (a), lumières (b), boutons de réponse (c), écran opaque (d). L'expérimentateur faisait glisser l'item le long de rails, par la case d'entrée, avant de l'immobiliser en position pour le traitement tactile (e).

b) Groupes expérimentaux et procédure :

Les participants ont été divisés en 4 groupes (voir Tableau 3). Ils ont effectué deux tâches consécutives du MRT (session 1 et session 2) sans temps limite, en condition intramodale (succession de deux sessions tactiles ou visuelles : Groupes T-T et V-V) ou en condition intermodale (alternance d'une session visuelle et d'une session tactile, ou inversement : Groupes V-T et T-V). Les mêmes items étaient administrés en condition visuelle et tactile, dans les deux sessions consécutives.

Tableau 3. Récapitulatif des groupes expérimentaux (n = 93 ; Exp. 1a)⁷.

GROUPE	n (femmes ; hommes)	SESSION 1	SESSION 2
T-T	13 ; 12	14 items tactiles	14 items tactiles
V-V	10 ; 12	14 items visuels	14 items visuels
V-T	12 ; 11	14 items visuels	14 items tactiles
T-V	12 ; 11	14 items tactiles	14 items visuels

Dans les deux conditions sensorielles, les participants ont été testés individuellement dans une pièce silencieuse et recevaient les mêmes consignes verbales (consignes standard générales, voir Vandenberg & Kuse, 1978). Ensuite, deux items d'entraînement présentaient les objectifs et les exigences de tâches (i.e., équipements particuliers, mode d'émission des réponses, etc.). Les items d'entraînement n'étaient pas réutilisés dans la phase expérimentale proprement dite. Au cours des deux sessions expérimentales, les participants avaient comme consigne d'identifier le plus rapidement possible les 2 choix de réponses correctes, sans qu'aucune information ne leur soit donnée sur l'exactitude de leur réponse. Entre les sessions, une pause de cinq minutes était allouée aux participants permettant à l'expérimentateur de préparer l'équipement pour la session suivante. La participation durait environ une heure.

Mesure des mouvements oculaires, enregistrement des réponses par item et définition du temps par item.

Les quatorze items de la condition visuelle ont été intégrés dans un programme de présentation d'images suivant une option du système Eyelink II® (©2002a). Le système de mesure enregistrait les mouvements et fixations des pupilles oculaires durant l'inspection

⁷ Correspond au nombre de participants effectivement conservé dans l'analyse, selon critères, voir note de bas de page ⁽⁴⁾, p. 47.

des modèles et des choix de réponse. Un bandeau spécial, ajusté au contour de la tête des participants, était muni de caméras haute fréquence qui échantillaient les images de l'œil le mieux calibré, à une fréquence de 250 Hz (mesure monoculaire). Une troisième caméra sur le bandeau captait la position de quatre marqueurs infrarouges situés sur les quatre coins de l'écran d'ordinateur. Ce système permet d'estimer la position du regard avec une précision d'au moins 0.5° , à un seuil de vitesse de $30^\circ/\text{s}$ et un seuil d'accélération de $8000^\circ/\text{s}^2$. La mesure s'ajuste aux mouvements de tête des participants, rendant l'utilisation d'une mentonnière non nécessaire. Un exercice de calibration préalable adapte la mesure pour chaque participant. Durant la tâche visuelle, la mesure a été calibrée et ajustée en continu entre chaque item par un exercice de fixation simple d'un point central à l'écran. L'utilisation d'une tablette graphique a permis d'enregistrer les réponses des participants. La mesure des mouvements oculaires a permis le calcul des temps de réponse par item.

Les points de fixation oculaires sur les objets témoignent d'un programme d'exploration visuelle en cours de tâche (Hayehoe, 2004 ; Pailhous, 1970). Pour les buts de cette étude, les temps d'inspection sur les modèles et choix de réponse ont été utilisés pour calculer le temps total par items. Le programme Eyelink Data Viewer (©2002b) a servi à préparer les données nécessaires au calcul de temps. Un temps d'inspection sur un objet débutait lorsque l'inspection visuelle accédait la zone d'intérêt d'un objet, et prenait fin lorsque l'inspection visuelle quittait la zone d'intérêt de l'objet. Les fixations oculaires en dehors des zones d'intérêt ont été considérées comme n'ayant pas participé directement à l'analyse perceptuelle des items (moins de 1 % des fixations, en moyenne, par item). Le calcul du temps total par item était équivalent à la somme de tous les temps d'inspection visuels sur les objets de l'item.

Mesure de l'exploration tactile, enregistrement des réponses par item et définition du temps par item.

L'exploration tactile des participants a été filmée à l'aide d'une caméra digitale. Un programme spécial, Actogram Kronos™ (version 1.1., ©Octares editions, Toulouse, France ; voir Kerguelen, 2008), a permis de traiter les relevés comportementaux d'observation. En plus des objets, la zone filmée incluait les lumières activées par les réponses des participants ce qui permettait de calculer le temps par item ainsi que la somme des réponses correctes dans le but d'établir les scores de précision individuels.

Les relevés ont permis de décrire spécifiquement les déplacements de la main filmée, dans l'espace des objets. L'exploration tactile de tous les participants a été séquencée en états comportementaux observables. Ces états décrivent des durées qui, pour chaque inspection tactile, commencent au premier contact de la main sur un objet et se terminent lorsque la main quitte l'objet. Les durées ainsi créées rejoignent la définition des temps d'inspection sur les objets dans la tâche visuelle. Le calcul du temps total par item était équivalent à la somme de tous les temps d'inspection sur les objets de l'item.

c) Analyse des données:

Les scores de précision visuels et tactiles, exprimés en pourcentages de réponses correctes sur 14 items, ont été calculés en utilisant une méthode standard d'attribution des scores (Vandenberg & Kuse, 1978 ; voir aussi Peters et al., 1995). Les participants devaient donner les deux réponses correctes aux items pour que leurs scores de précision puissent être considérés comme corrects. Pour chacun des items, les participants pouvaient réussir en répondant au hasard, selon un seuil chance de 16.67% (1/6).

Seuls les temps de réponse des réponses correctes ont été retenus. Les données temporelles extrêmes ont été enlevées des analyses selon un seuil critère de ± 2 écart-types (2.9% des données ; méthode intra-participant).

Pour les scores de précision et les temps de réponses, des ANOVAs ont été menées séparément par session. Les analyses sur la session 1 permettaient d'examiner les différences entre les tâches visuelles et tactiles, dans les différents groupes. Les analyses sur la session 2 évaluaient l'effet de l'expérience sensorielle préalable (i.e., condition intermodale vs. condition intramodale) sur les scores de précision (%) et les temps de réponses. Pour les deux sessions, les deux variables dépendantes ont été soumises à des ANOVAs à 2 Modalités (visuelle vs. tactile) x 2 Conditions (intermodale/avec changement vs. intramodale/sans changement). Les résultats significatifs à $p < .05$ ont été rapportés. Des analyses post-hoc au moyen du test de Newman-Keuls ont été réalisées, avec corrections de Bonferonni (Abdi, 2007 : seuils $p_s = .0125$; Welsch, 1972), le cas échéant. Les corrections de Bonferonni réalisées prennent en compte le fait que les analyses aient été menées sur quatre groupes indépendants.

Pour quantifier les changements de la session 1 à la session 2 (i.e., amélioration ou détérioration des scores de précision et des temps de réponse, respectivement), une nouvelle variable a été calculée (taux de changement ou TC). Elle représente le taux de

changement en session 2 par rapport aux niveaux de base visuels et tactiles, calculée pour chaque individu. Les TC sont exprimés en pourcentage (%), et formalisés suivant les étapes suivantes (selon la condition) :

Pour les groupes V-V et T-T (i.e., condition intramodale), la comparaison s'effectue sur la deuxième session, en fonction du niveau de base en session 1. Pour les groupes V-T et T-V, des estimations du niveau de base ont été calculées (modalité visuelle dans le groupe T-V, modalité tactile dans le groupe V-T) à partir de l'ensemble des performances des sujets en session 1 pour chacune des modalités sensorielles. Pour calculer le niveau de base, on moyenne toutes performances (X_i) répertoriées à la session 1 pour le score et pour le temps (visuelles ou tactiles) :

$$\text{Niveau de base} = \sum X_i \div N \quad (1)$$

Ensuite, le niveau de base est intégré dans la formule suivante :

$$\text{TC} = \left(\frac{\text{Niveau de base} - \text{session 2}}{\text{Niveau de base}} \right) * 100 \quad (2)$$

Lorsque l'on considère les scores de précision, un TC négatif exprime une amélioration du pourcentage de réponses correctes, alors qu'un TC positif exprime une détérioration. Lorsque l'on considère les temps de réponse, un TC négatif exprime une détérioration de la performance (temps de réponse plus longs en session 2), alors qu'un TC positif exprime une amélioration de la performance (temps de réponse plus courts en session 2). La variable TC a été soumise à des ANOVAs à 2 Modalités (visuelle vs. tactile) x 2 Conditions (intermodale vs. intramodale). Les résultats significatifs à $p < .05$ ont été rapportés. Des analyses par test-t de Student examinent si les TC diffèrent significativement de zéro (0%), c'est-à-dire si les participants améliorent ou détériorent leur performance lors du passage de la session 1 à la session 2 (avec corrections de Bonferonni).

Une analyse des compromis vitesse-précision est rapportée. De plus, des analyses corrélationnelles décrivent la relation entre les performances des sessions 1 et 2, ce qui permet d'évaluer la stabilité des rangs au MRT des participants dans les différentes Modalités, dans les différentes Conditions, par variable dépendante (% et temps).

1.2.2. Résultats :

Dans les quatre groupes, nous n'avons observé aucune corrélation (positive) significative entre les scores de précision et les temps de réponse pour les sessions 1 et 2, ou pour les Taux de Changement (TCs : scores de précision et temps), $r_s < 0.32$, $p_s > 0.12$, indiquant l'absence de compromis vitesse-précision⁸.

a) Analyse des pourcentages de réponses correctes

Les pourcentages de réponses correctes à la session 1 et à la session 2, ainsi que les TC par groupes sont rapportés dans le Tableau 4. L'analyse menée à la session 1 ne révèle aucun effet de la Modalité et de la Condition, ni d'interaction entre ces facteurs ($F_s < 2.5$) ($V = 64\% \pm 15.5$; $T = 66\% \pm 16.2$). Tous les groupes donnent significativement plus de 50% de réponses correctes, $t_s > 3.81$, $p_s < .05$. Les pourcentages de réponses correctes en session 1 sont retenus comme niveaux de base dans l'analyse des TC rapportée plus bas.

Tableau 4. Pourcentages moyens de réponses correctes (avec écarts-types) à la session 1 et à la session 2, et les taux de changement moyens (avec écarts-types), par groupes.

	Session 1	Session 2	TC
Groupe T-T	69.4% (18.6)	79.4% (16.5)	- 14.8 % (24)
Groupe V-V	61.6% (14.3)	72.4% (12.5)	- 17.4 % (20.3)
Groupe V-T	66 % (16.6)	78.5% (17.3)	- 18.8 % (26.3)
Groupe T-V	62.5 % (15.3)	68.6% (20.6)	- 7.6 % (32)

L'analyse des pourcentages de réponses correctes, menée sur la session 2, révèle seulement un effet principal de la Modalité, $F(1,89) = 5.746$, $\eta_p^2 = 0.06$, $p < .05$. Les participants obtiennent un score de précision plus important dans la tâche tactile que dans la tâche visuelle ($V = 70.5\% \pm 17$; $T = 79\% \pm 16.7$).

⁸ Pour les groupes V-T et T-T, nous obtenons des corrélations négatives significatives entre les scores de précision et les temps de réponse pour la session 2, $r_s > -.37$, $p_s < .05$ (groupe T-V, session 1 uniquement, $r = -.42$, $p = 0.04$), et entre TC temps et TC précision pour ces mêmes deux groupes, $r_s > -.39$, $p_s < .05$. Les corrélations négatives suggèrent que les participants rapides obtiennent les plus hauts scores au MRT tactile, en session 2. De même, les participants de la tâche tactile qui s'améliorent le plus en temps de réponses s'améliorent le plus en précision, de la session 1 à la session 2.

Pour les TC, l'ANOVA ne révèle pas d'effet principal de la Modalité, de la Condition, ni d'interaction ($F < 1.6$). La moyenne totale des TC est de $-14.65\% \pm 26$. Rappelons qu'une valeur négative indique une amélioration du score de précision de la session 1 à la session 2. Les groupes T-T, V-V, et V-T ont des TC différents de zéro, $t_s > -3.07$, $p_s < .0125$, alors que le TC du groupe T-V ne diffère pas significativement de zéro, $t(22) = -1.12$, $p > .05$. Les trois premiers groupes améliorent leurs scores de précision en session 2, ce qui n'est pas le cas du groupe T-V (voir Figure 14). Dans le cadre de cette expérience, un TC de -7% équivaut une amélioration moyenne de $+1$ item réussi à la session 2 par rapport aux résultats en session 1. Ainsi, les groupes T-T, V-V, V-T, et T-V s'améliorent en session 2, respectivement, de 2.1, 2.4, 2.6, et 1 item(s) réussis en moyenne.

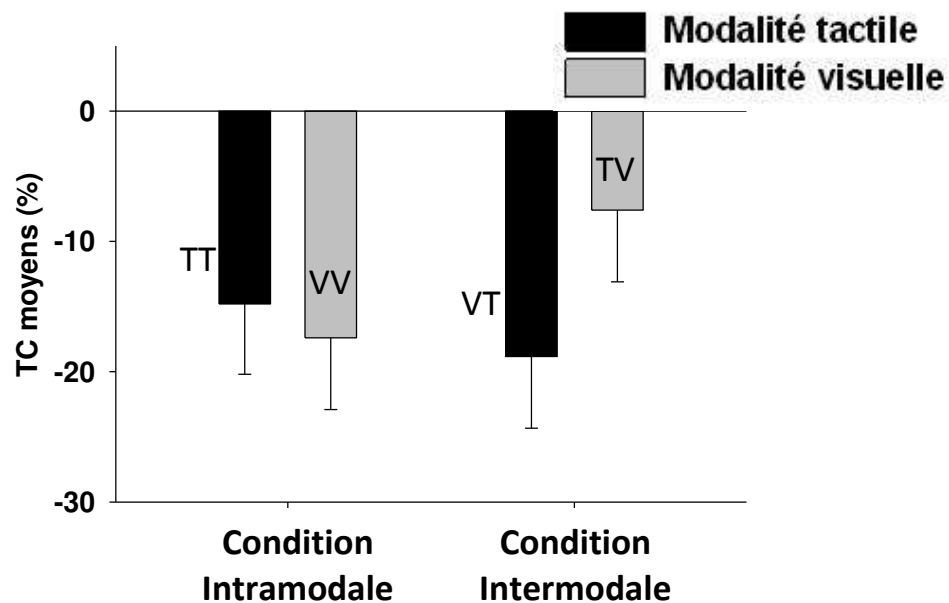


Figure 14. Taux de changement moyens des scores de précision (avec erreurs types), par modalité sensorielle, par condition (intramodale vs. intermodale). Rappel : un TC négatif traduit une amélioration du score de précision de la session 1 à la session 2.

b) Analyse des temps de réponse

La Figure 15 (p. 59) illustre les temps de réponse moyens par modalité, par condition, aux deux sessions. Pour la session 1, l'ANOVA révèle un effet principal de la Modalité, $F(1,89) = 112.1$, $\eta_p^2 = 0.56$, et une interaction entre ce facteur et la Condition, $F(1,89) = 4.1$, $\eta_p^2 = 0.04$, $p_s < .05$. Des temps de réponse plus courts apparaissent pour les participants en modalité visuelle. Dans la tâche tactile, les temps de réponse tendent seulement à différer entre les deux groupes ($p = .055$).

Pour la session 2, l'ANOVA révèle un effet principal de la Modalité, $F(1,89)=92.5$, $\eta_p^2=0.51$, et de la Condition, $F(1,89)=8.2$, $\eta_p^2=0.08$, $ps<.05$, sans interaction entre ces facteurs ($F<1$). Comme à la session 1, les temps de réponse des participants en modalité visuelle sont généralement plus courts que ceux des participants en modalité tactile. Les temps de réponse des participants en condition intermodale sont plus longs que les temps de réponse en condition intramodale.

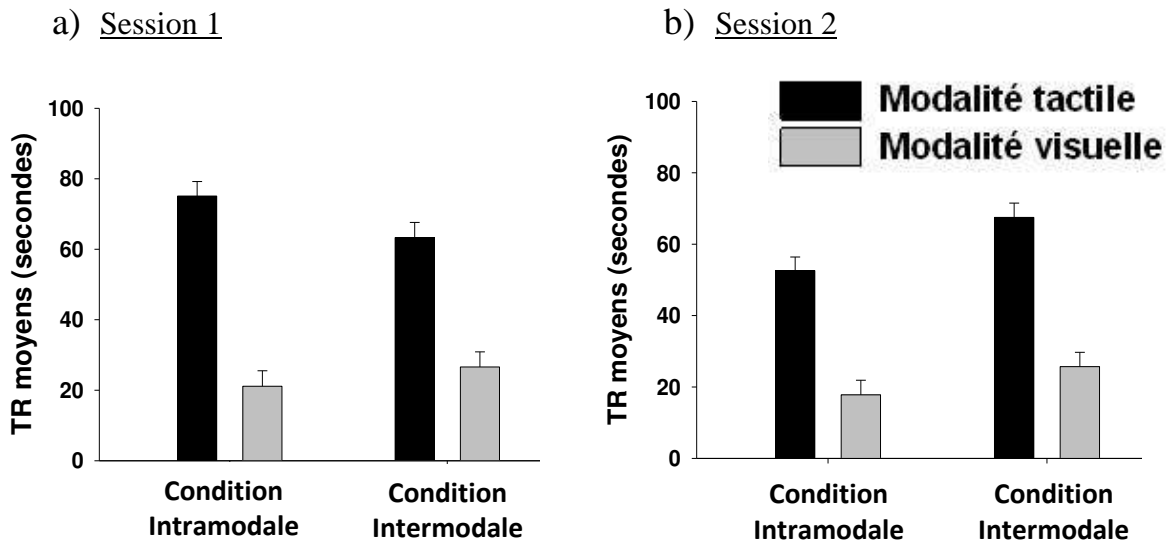


Figure 15. Temps de réponse (secondes, avec erreurs types) aux sessions 1(a) et 2(b), par modalité sensorielle et par condition (intramodale vs. intermodale).

L'ANOVA sur les TC (Figure 16, p. 60) révèle un effet principal de la Modalité, $F(1,88)=4.12$, $\eta_p^2=0.045$, et de la Condition, $F(1,88)=9.49$, $\eta_p^2=0.10$, $ps<.05$, sans interaction entre ces facteurs ($F<1$). Les TC en session 2 traduisent une amélioration (valeur positive des TC) plus importante des temps de réponse pour la modalité tactile que pour la modalité visuelle. Les performances des groupes T-T, V-V, V-T, et T-V changent en session 2 de -22.1, -3.3, -5.6, et +1.8 secondes, en moyenne. Seuls les groupes de la condition intramodale (T-T et V-V) améliorent significativement leurs temps de réponses de la session 1 à la session 2 (différents de zéro : $ts>2.32$, $p<.03$), le résultat du groupe V-V n'atteignant toutefois pas le seuil de signficativité suite à la correction appliquée de Bonferonni ($p>.0125$).

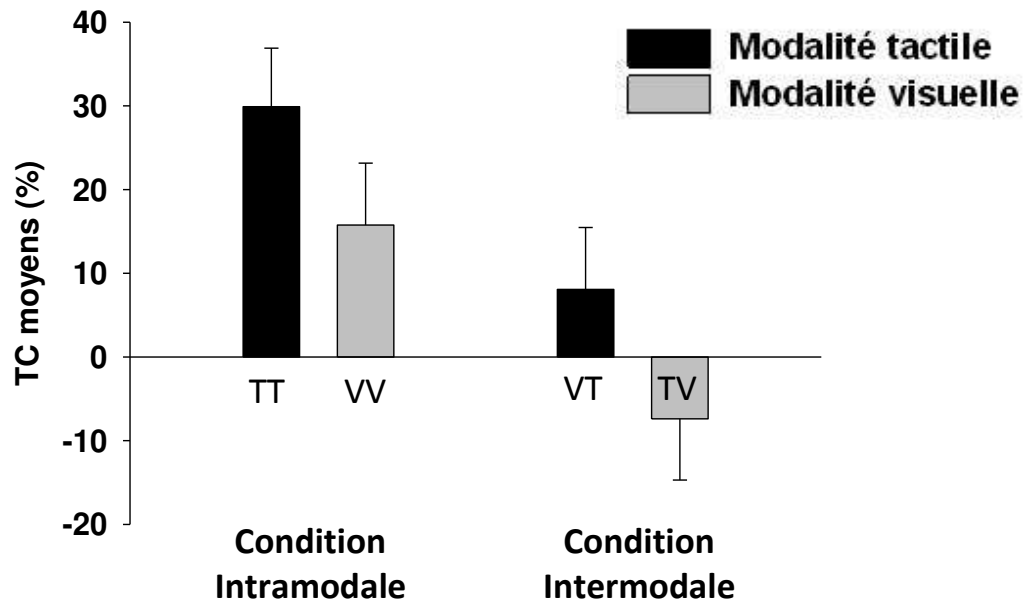


Figure 16. Taux de changement moyens des temps de réponse (avec erreurs types), par modalité de tâche, par condition (intramodale vs. intermodale). Rappel : un TC positif traduit une amélioration de la performance, c'est-à-dire une diminution des temps de réponse de la session 1 à la session 2.

c) Analyses corrélationnelles

L'analyse des corrélations entre les scores de précision des sessions 1 et 2 révèle que les participants des groupes V-T, T-V et T-T obtenant les meilleurs (ou moins bons) scores de précision en session 1 obtiennent les meilleurs (ou moins bons) scores de précision en session 2 ($r_s > .56$, $p_s < .05$; V-V, $r = .29$, $p > .05$). Pour les temps de réponse, des corrélations positives significatives sont rapportées pour les conditions intramodales, V-V ($r = .74$, $p < .05$) et T-T ($r = .75$, $p < .05$), uniquement. Par contre, pour les groupes en condition intermodale, aucune corrélation significative n'est observée (groupes V-T et T-V; $r_s < 0.39$, $p_s > .06$).

1.2.3. Discussion :

Dans la première partie de cette expérience, nous avons comparé les performances visuelles et tactiles au Test des Rotations Mentales (Vandenberg & Kuse, 1978). L'utilisation d'un plan expérimental intra-sujets nous a permis d'évaluer l'influence d'une expérience sensorielle spécifique préalable sur les performances subséquentes des participants.

Nos résultats démontrent des scores de précision similaires entre la vue et le toucher à la première session, avec un léger avantage tactile à la deuxième session. Toutefois, les temps de réponses tactiles se sont avérés plus longs que les temps de réponses visuelles. L'analyse des Taux de Changement (TC) a révélé, quant-à-elle, différents patterns lorsque l'on compare la précision et les temps de réponse. Rappelons que les scores de précision sont liés à la qualité des représentations, alors que les temps de réponses sont liés au temps imparti à la mise en place de différents processus de traitement (Egan, 1978). Ces deux patterns de résultats peuvent donc être interprétés séparément.

Concernant les TC pour les scores de précision, l'ANOVA suggère une indépendance sensorielle des processus de traitement, les performances étant similaires en condition intermodale et intramodale. Les aptitudes spatiales évaluées par le MRT ne dépendraient donc pas d'une modalité sensorielle ou d'une autre en ce qui a trait à la qualité des représentations élaborées via une expérience sensorielle visuelle ou tactile. Ce résultat va dans le sens d'études récentes démontrant l'existence de représentations multisensorielles pour les formes géométriques (Lacey, Pappas, Kreps, Lee, & Sathian, 2009 ; Lacey, Tal, Amedi, & Sathian, 2009), laissant aussi supposer la formation de descriptions structurales similaires d'objets lorsque l'on compare la vue et le toucher dans des tâches d'aptitudes spatiales (Reales & Ballesteros, 1999).

Par contre, l'importance des TC doit être considérée. L'amélioration de la précision se limite à moins de trois items du MRT réussis par groupe, et à un seul pour le groupe tactile-visuel. Par ailleurs, seul ce dernier groupe ne s'améliore pas significativement lorsque l'on considère les analyses par test-t de Student. Nos résultats reflètent ainsi une spécificité du traitement tactile, lorsque le traitement tactile n'est pas précédé par une expérience préalable visuelle. Ce résultat va dans le sens de celui rapporté par Behrmann et Ewell (2003), ayant montré une difficulté de transfert intermodal de l'expertise tactile pour des objets non-familiers. Nos analyses corrélationnelles ont néanmoins montré que les participants en condition intermodale, obtenant des scores élevés (ou faibles) en session 1, obtiennent aussi des scores élevés (ou faibles) à la deuxième session. Ces résultats démontrent qu'un facteur de performance individuel demeure constant indépendamment du changement d'une modalité sensorielle à l'autre. La nature exacte de ce facteur individuel reste à définir.

Concernant les TC pour les temps de réponse, l'ANOVA révèle un effet de la condition : seuls les groupes intramodaux se sont améliorés de la session 1 à la session 2 (tendance V-V). Ce résultat démontre que les habiletés relevant de processus de traitement

de l'information visuelle ou tactile, développés par les participants lors de la première session, ne sont pas transférables d'une modalité à l'autre (session 2, condition intermodale). Les analyses corrélationnelles vont aussi dans ce sens en démontrant une stabilité intra-individuelle de la vitesse de traitement en condition intramodale seulement. Ainsi, ces résultats démontrent des processus distincts entre la vue et le toucher (i.e., spécificité sensorielle du mode de traitement des informations spatiales).

En somme, lorsque l'on considère les ANOVAs, certaines composantes des aptitudes de rotation mentale, telles que mesurées par le MRT, sont indépendantes d'une modalité sensorielle ou l'autre. La vue et le toucher peuvent donc contribuer également à l'élaboration de représentations multisensorielles de haut niveau (Toussaint, Caissie, & Blandin, 2012, voir Annexes). Leur élaboration dépend toutefois d'un traitement différencié des informations issues des récepteurs visuels et des récepteurs tactiles.

Lorsque l'on considère l'importance des TC intermodaux de précision, nous n'observons pas de transferts significatifs des informations tactiles dans la tâche visuelle. Nos analyses démontrent un transfert intermodal significatif seulement lorsque le traitement visuel précède le traitement tactile. Par conséquent, l'élaboration d'une représentation visuelle de la tâche en session 1 favorise le développement des représentations tactiles à la deuxième session. On notera toutefois l'efficacité du traitement des informations tactiles en l'absence d'une représentation visuelle préalable (i.e., un traitement de qualité est possible alors que les participants n'ont jamais vu les objets du MRT). Les aptitudes spatiales ne dépendraient donc pas de processus visuels, comme suggéré dans les études sur les aveugles congénitaux (Carpenter & Eisenberg, 1978 ; Röder et al., 1997 ; Rösler et al., 1993). Cependant, notre étude montre qu'une connaissance visuelle de la tâche à réaliser peut faciliter la performance tactile, au même titre qu'une expérience préalable tactile.

Enfin, notre première expérience ne permet pas de définir explicitement les processus impliqués dans l'amélioration inter – ou intra – modale en rotation mentale (i.e., processus perceptifs, processus de rotation mentale). Par contre, comme Heil et collaborateurs (1998) le rapportent, l'amélioration des processus de rotation mentale visuelle serait de nature implicite. D'autres auteurs (Wright, Thompson, Ganis, Newcombe, & Kosslyn, 2008) ont rapporté des effets de pratique pouvant se généraliser à des stimuli nouveaux ou à des tâches spatiales nouvelles, et spécifiquement lors d'exercices répétés pour des essais adjacents (Ackerman, 1989). En utilisant le MRT, l'intérêt était placé sur les processus généraux, sans distinction faite entre encodage des

informations et processus de rotation mentale. La question de savoir si l'amélioration dans le changement des modalités sensorielles est liée à l'amélioration des processus de rotation mentale reste ainsi ouverte. Avant de répondre à cette question (Expérience 2a), nous aurons comme objectif, dans l'Expérience 1b, de comparer les données métrologiques des performances visuelle et tactile au MRT, au moyen d'une étude psychométrique. Dans l'Expérience 1c, nous évaluerons l'effet modulateur de la difficulté des items sur les transferts intermodaux (et apprentissages intramodaux) au MRT.

1.3. EXPERIENCE 1b : Comparaison des qualités psychométriques visuelles et tactiles du Test des Rotations Mentales.

Dans l'Expérience 1b, nous évaluons la généralité des modèles de difficulté basés sur les caractéristiques d'items déjà définies pour le MRT (Caissie et al., 2009 ; Voyer & Hou, 2006 ; cf. section 4.2.), en comparant, dans un plan inter-sujets, les patrons de réponse visuels et tactiles répertoriés dans l'Expérience 1a (session 1). Nous avons noté dans la littérature de bonnes relations entre des tâches spatiales visuelles et tactiles (Stankov et al., 2001). Toutefois, aucune étude psychométrique n'a encore comparé les performances obtenues à des tests valides d'aptitudes spatiales visuelles et leurs répliques tactiles. Dans cette étude, des analyses psychométriques permettent en premier lieu d'évaluer les similarités/dissimilarités d'échelles visuelle et tactile concernant la normalité des distributions (scores et temps), les difficultés (scores et temps), la fiabilité des échelles de mesure, et la validité concomitante par critère⁹ externe.

Dans cette nouvelle étude, les items considérés comme étant les plus difficiles au MRT visuel seraient aussi les plus difficiles au MRT tactile. Les items miroirs seraient plus difficiles que les items structuraux. Les items homogènes seraient plus difficiles que les items hétérogènes. Les items occlus seraient plus difficiles que les items non occlus (cf. section 4.2.). Une difficulté dans cette analyse est liée au fait que les caractéristiques ne sont pas nécessairement représentées de façon exclusive dans les différents items. Par exemple, l'occlusion visuelle ne serait pas un facteur contribuant à la difficulté de la tâche tactile. Les items occlus seraient amalgamés à d'autres caractéristiques (i.e., homogènes) pouvant mieux expliquer la difficulté visuelle (Caissie et al., 2009 ; Vigneau et al., sous presse) et tactile.

Les caractéristiques d'objets (i.e., visuelles et tactiles) peuvent affecter le temps d'inspection et d'analyse spatiale des participants. Ainsi, les items considérés comme étant les plus difficiles nécessiteraient plus de temps. Par exemple, dans leur étude, Vigneau et collaborateurs (sous presse) ont montré des temps de réponse significativement plus longs pour les items visuels homogènes, comparativement aux items hétérogènes. De même, en modalité tactile, les items avec asymétrie structurale pourraient être plus rapidement représentés (i.e., items hétérogènes), comparativement aux items homogènes. Enfin, moins de temps serait nécessaire pour des items impliquant une différenciation de structures (i.e.,

⁹ Le critère est une tâche d'aptitudes spatiales pouvant ou non avoir la même validité de mesure que les MRT visuel et tactile. Une corrélation élevée entre le critère d'aptitudes spatiales et les MRT pourrait suggérer l'appartenance des MRT au même réseau nomologique, définissant des relations avec d'autres tâches de même nature en aptitudes spatiales.

items structuraux), comparativement aux items miroirs. Par contre, l'occlusion visuelle décrite par Voyer et Hou (2006) n'affecterait pas les temps de traitement tactile.

Nous évaluerons la relation entre la réussite pour différentes catégories d'items du MRT (visuel et tactile) et les aptitudes spatiales visuelles mesurées par un critère externe, le Test des Figures Encadrées (EFT ; Witkin, Oltman, Raskin, & Karp, 1971). Une relation significative entre la réussite pour certaines catégories d'items tactiles et les scores EFT pourra suggérer une similarité entre processus de traitement tactile au MRT et les aptitudes visuo-spatiales en général. Compte tenu des données de la littérature, différents items du MRT visuel peuvent nécessiter différents processus de résolution, visuels ou spatiaux (Caissie et al., 2009 ; Geiser et al., 2006 ; Shiina & Suzuki, 1999 ; Voyer & Hou, 2006 ; Voyer et al., 2004). Nous évaluerons, par cette analyse, quels items, dans une modalité sensorielle ou l'autre, peuvent nécessiter des processus de résolution visuels (relation significative au score visuel EFT) et lesquels peuvent nécessiter des processus de résolution spatiaux (aucune relation au score visuel EFT).

Une mesure similaire des caractéristiques d'items pourrait suggérer l'équivalence d'un modèle visuel et d'un nouveau modèle tactile, et une validation de l'hypothèse des descriptions structurales similaires pour la vue et le toucher (Lacey & Sathian, 2007 ; Reales & Ballesteros, 1999). Nous pourrions ainsi considérer l'échelle de mesure du MRT comme étant plutôt générale. Enfin, des tâches perceptuelles d'illusions optiques et leurs répliques tactiles (Heller, 2000 ; Heller & Joyner, 1993) ont déjà permis de constater des patrons d'erreurs perceptuelles similaires suite à une exploration dans les deux modalités sensorielles. Toutefois, la généralité de l'illusion peut être due à des traitements intrinsèques spécifiques visuels et spécifiques tactiles. Ainsi, la similarité des résultats au MRT peut dépendre d'un traitement unique ou spécifique de chacune des modalités sensorielles (i.e., plusieurs routes mènent au même endroit), tels que les résultats des transferts de l'Expérience 1a le suggèrent.

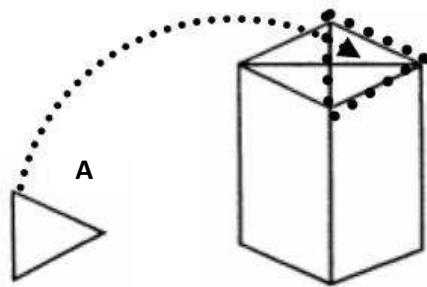
1.3.1 Méthode :

Cent cinq participants ont été retenus pour ces analyses¹⁰ (52 femmes et 53 hommes ; âge moyen = 24.7±4.6). Ils ont été répartis en deux groupes indépendants, visuel (n=51) et tactile (n=54).

¹⁰ L'analyse psychométrique a été menée sur les relevés des participants de l'Expérience 1a, en ajoutant aussi les participants obtenant des pourcentages de bonnes réponses inférieurs à 35%.

a) Analyses et Tâches :

Les analyses ont été menées sur la session 1 du MRT visuel et tactile (cf. Expérience 1a) et sur la session 2. Les résultats de la deuxième session ont permis d'analyser la fiabilité par stabilité test-retest pour les participants de la condition intramodale (groupe V-V, n=27 ; groupe T-T, n=26). N'ayant pas servi dans le traitement de l'Expérience 1a, le Test des Figures Encastrées ou le « Embedded Figures Test » (EFT ; Witkin et al., 1971 ; Oltman, Raskin, & Witkin, 1985) est utilisé dans cette nouvelle analyse en tant que critère externe d'aptitudes spatiales visuelles dans des analyses de validité concomitante des MRT et des caractéristiques d'items¹¹. L'EFT (Witkin et al., 1971 ; Carter & Loo, 1980) est un test visuel spatial administré sous forme papier crayon. Il s'agit d'un test comprenant 18 items administrés en deux sessions de 5 minutes, précédées de 8 items illustratifs de la tâche. Chaque item illustre une représentation graphique sous forme de figure complexe, dessinée en deux dimensions sur papier et laissant paraître un agencement de plusieurs formes simples. Les participants doivent pour chaque item trouver et tracer (restituer) au crayon le contour d'une forme simple dissimulée dans la figure complexe. La Figure 17 illustre un item de l'EFT.



Trouvez la forme simple « A »

Figure 17. Illustration d'un item du Test des Figures Encastrées (EFT).

b) Analyse des données :

Les pourcentages de réponses correctes tels que définis dans l'Expérience 1a ont été retenus pour les analyses. Les données temporelles extrêmes intra-individuelles et inter-individuelles ont été enlevées des analyses selon un seuil critère de ± 2 écart-types (3% des

¹¹ L'EFT était administré à tous les participants suivant leur participation aux deux sessions de l'Expérience 1a.

données). L'analyse psychométrique des temps moyens de réponse aux items du MRT (visuel et tactile) a été menée sur les items réussis et non réussis. Ce choix était en lien avec l'analyse plus globale des comportements de réponses visuels et tactiles, appropriée pour cette étude psychométrique. L'analyse a été menée par des tests : de normalité, de distributions, de fiabilité par méthodes des covariances et de stabilité par test-retest, et de validité concomitante par critère externe.

Les scores composites, sous forme de pourcentages de réponses correctes, ainsi que les temps moyens des réponses correctes, ont été calculés pour chacune des caractéristiques des MRT visuel et tactile. En tout, six caractéristiques se définissent selon trois catégories dichotomiques d'items au MRT, telles que suggérées dans la littérature : 1. Items occlus (9, 10, 11, et 14) vs. Items non-occlus (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 13), 2. Items miroirs (1, 2, 5, 6, 9, 10, 11, 12) vs. Items structuraux (3, 4, 7, 8, 13, 14) ; 3. Items homogènes (9, 10, 11, 13, 14) vs. Items hétérogènes (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12). Trois ANOVAs à deux niveaux ont été menées séparément pour chaque type de modèle : 1. Occlusion ; 2. Distracteurs ; 3. Configurations. Les variables dépendantes (pourcentage de réponses correctes et temps de réponses) ont été soumises à des ANOVAs à 2 Modalités (visuelle vs. tactile) x 2 Caractéristiques d'items (i.e., miroir vs. structuraux). Les résultats significatifs à $p < .05$ ont été rapportés, ainsi que des analyses post-hoc le cas échéant (Tests de Newman-Keuls). Une analyse de validité concomitante par critère externe a aussi été menée par caractéristique des items (pourcentage et temps) en rapport aux scores EFT.

1.3.2. Résultats :

a) Analyses de normalité et des distributions sur les scores (%)

Les pourcentages de réponses correctes aux deux versions du MRT se distribuent de façon normale (MRT Visuel : Test de Shapiro-Wilks- $W=0.976$, $p>.05$; MRT Tactile : Test de Shapiro-Wilks- $W=0.961$, $p>.05$). Les moyennes par groupes sont de 61% (± 19.6) au MRT visuel et de 65% (± 19.6) au MRT tactile. Les pourcentages de réponses correctes par items visuels et tactiles sont présentés au Tableau 5 (p. 69). Les difficultés d'items visuels et tactiles, par variation des pourcentages corrects sur les items 1 à 14, corréleront fortement, $r=.85$ ($p<.05$). La difficulté se distribue donc de façon très similaire, entre les deux modalités de tâche, par une variation commune de 72%.

b) Analyses de normalité et de distribution des temps de réponse

Les temps moyens se distribuent de façon normale sur la version tactile (Test de Shapiro-Wilks, $W=0.96$, $p>.05$), ce qui n'est pas le cas pour la version visuelle du MRT (distribution leptokurtique ; $W=0.90$, $p=.0003$). La distribution leptokurtique caractérise une surreprésentation au centre de la distribution des temps moyens visuels, avec très peu de dispersion. Les distributions des temps moyens, par variation sur les items 1 à 14, seraient fortement corrélées entre les deux versions, $r=.68$ ($p<.05$), pour une variation commune de 46%. Par observation qualitative, dans les deux modalités, se sont les items 9 et 11 (miroirs-homogènes-occlus) qui nécessitent le plus de temps comparativement aux autres items. L'item 8 (structural-hétérogène) nécessite le moins de temps dans les deux modalités. Les temps moyens par item (avec statistiques descriptives associées) pour les deux groupes, sont présentés au Tableau 5 (p. 69).

c) Analyse de fiabilité par méthodes de covariances et par test-retest

Une analyse de fiabilité par bissection (paire-impair) avec correction Spearman-Brown donne des coefficients de consistance interne similaires entre le MRT visuel (score=.68 ; temps=.87) et le MRT tactile (score=.72 ; temps=.86). La fiabilité calculée par la méthode corrélationnelle test-retest, sur les groupes visuels ($N=27$) et tactiles ($N=26$) ayant répété les 14 items du MRT (session 2), donne des indices visuels similaires à ceux de l'analyse Spearman-Brown (MRT visuel, score : $r=.69$, temps : $r=.78$) et des indices tactiles légèrement inférieurs (MRT tactile, score : $r=.61$, temps : $r=.68$).

d) Analyse de validité concomitante par critère externe (EFT)

Cette partie de l'analyse évalue le lien entre une mesure d'aptitudes visuo-spatiales, l'EFT, et les performances aux MRT visuel et tactile. Les scores moyens à l'EFT (avec statistiques descriptives associées) sont présentés au tableau 6 (p. 69). Les moyennes à l'EFT et au MRT ne diffèrent pas statistiquement entre les deux groupes. Une analyse par critère externe montre une relation significative, pour les deux groupes, entre les performances à l'EFT et au MRT. La corrélation entre les scores à l'EFT et les scores au MRT visuel est $r=.53$ ($p<.05$). La corrélation entre les scores à l'EFT et les scores au MRT tactile est $r=.32$ ($p<.05$). Ces coefficients de corrélation ne sont pas significativement différents ($p=0.20$) et peuvent être considérés comme statistiquement homogènes. Aucune

relation significative n'est observée entre le score à l'EFT et les temps de réponses moyens aux MRT (Tactile : $r=-.24$, $p>.05$; Visuel : $r=.03$, $p>.05$).

Tableau 5. Pourcentages de réponses correctes et temps de réponse (avec écarts-types) par items à la session 1, sur les versions visuelle et tactile du Test des Rotations Mentales.

<u>GROUPE VISUEL</u>				
REponses CORRECTES		TEMPS DE REponses (secondes)		
IT #	%	MOYENNE	ECART-TYPE	ASYMETRIE
1	39%	21.65	8.88	1.30
2	50%	24.45	11.81	1.16
3	76%	22.16	14.92	1.68
4	80%	20.74	11.25	1.52
5	46%	26.68	12.63	1.10
6	59%	20.75	9.37	0.86
7	78%	23.74	14.02	1.39
8	80%	17.79	9.05	0.94
9	17%	33.67	22.35	1.34
10	54%	24.37	14.15	1.26
11	54%	29.10	14.84	1.30
12	76%	19.90	8.14	0.67
13	81%	26.61	16.71	1.20
14	65%	28.46	14.09	0.56

<u>GROUPE TACTILE</u>				
REponses CORRECTES		TEMPS DE REponses (secondes)		
IT #	%	MOYENNE	ECART-TYPE	ASYMETRIE
1	41%	83.91	45.36	1.17
2	47%	84.85	47.13	1.00
3	92%	62.27	34.69	1.48
4	86%	61.14	35.25	0.79
5	57%	94.25	68.21	2.59
6	57%	64.33	39.07	1.06
7	84%	60.83	37.13	1.41
8	96%	45.65	21.80	0.44
9	41%	108.70	57.46	0.76
10	45%	86.35	42.97	0.59
11	41%	97.12	64.55	1.69
12	67%	79.52	45.89	0.91
13	86%	69.35	24.95	0.18
14	76%	75.55	43.55	1.29

Tableau 6. Scores moyens par groupe à l'EFT, avec écarts-types (ET), asymétries (As.) et aplatissements (Ap.).

	<u>GROUPE TACTILE</u>	<u>GROUPE VISUEL</u>
Scores moyens EFT	12.42	12.89
ET	3.81	4.21
As.	- 0.59	-1.16
Ap.	- 0.23	0.50

e) ANOVA sur les pourcentages de réponses correctes par caractéristiques d'items

Les facteurs de difficulté d'items ont été analysés séparément par modèles : 1. Occlusion ; 2. Distracteurs ; 3. Configurations. L'ANOVA sur Occlusion révèle uniquement un effet principal de la Caractéristique d'item (avec vs. sans occlusion visuelle), $F(1,103)=58.89$, $p<.05$, $\eta_p^2=0.36$, sans effet de la Modalité (visuelle vs. tactile), ni d'interaction entre ces facteurs ($F<1$). Les items avec occlusion visuelle sont plus difficiles que les items sans occlusion visuelle dans les deux modalités sensorielles. L'ANOVA sur Distracteurs révèle seulement un effet principal de la Caractéristique d'item (miroir vs. structuraux), $F(1,103)=144.4$, $p<.05$, $\eta_p^2=0.58$, avec une interaction tendancielle entre ce facteur et la Modalité, $F(1,103)=3.58$, $p=.06$, $\eta_p^2=0.03$. Les items miroir seraient plus difficiles que les items structuraux dans les deux modalités sensorielles. Les participants dans la modalité tactile tendent toutefois à mieux réussir les items structuraux que les participants dans la modalité visuelle ($T>V$, $p<.05$; items miroirs $T=V$, $p=.96$). L'ANOVA sur Configurations révèle seulement un effet principal de la Caractéristique d'item (homogène vs. hétérogène), $F(1,103)=23.4$, $p<.05$, $\eta_p^2=0.19$, sans effet de la Modalité, ni d'interaction entre ces facteurs ($F_s<1.3$). Les items à configuration homogène seraient plus difficiles que les items à configuration hétérogène dans les deux modalités sensorielles. Ces résultats sont illustrés à la Figure 18 (p. 71).

f) ANOVA sur les temps de réponses par caractéristiques d'items

Les facteurs affectant les temps de réponses ont été analysés séparément par modèles : 1. Occlusion ; 2. Distracteurs ; 3. Configurations. L'ANOVA sur Occlusion révèle un effet principal de la Caractéristique d'item, $F(1,103)=58.89$, $\eta_p^2=0.36$, et de la Modalité, $F(1,103)=157.64$, $\eta_p^2=0.60$, $ps<.05$, sans interaction entre ces facteurs ($F=1.19$). Les items avec occlusion visuelle nécessitent en moyenne plus de temps d'analyse que les items sans occlusion dans les deux modalités sensorielles. L'ANOVA sur Distracteurs révèle seulement un effet principal de la Modalité, $F(1,103)=160.09$, $p<.05$, $\eta_p^2=0.61$, sans effet de la caractéristique, ni d'interaction ($F<1.18$). L'ANOVA sur Configurations révèle un effet principal de la Caractéristique d'item, $F(1,103)=17.6$, $\eta_p^2=0.15$, et de la Modalité, $F(1,103)=160.1$, $\eta_p^2=0.61$, et une interaction entre ces deux facteurs, $F(1,103)=3.99$, $\eta_p^2=0.03$, $ps<.05$. Des tests post-hoc montrent que les items à configuration homogène nécessitent significativement plus de temps d'analyse que les items hétérogènes, seulement

pour la modalité tactile ($T_{\text{homog}}=T_{\text{heterog}}$, $p<.05$; $V_{\text{homog}}=V_{\text{heterog}}$, $p=.12$). Ces résultats sont illustrés à la Figure 19 (p. 72).

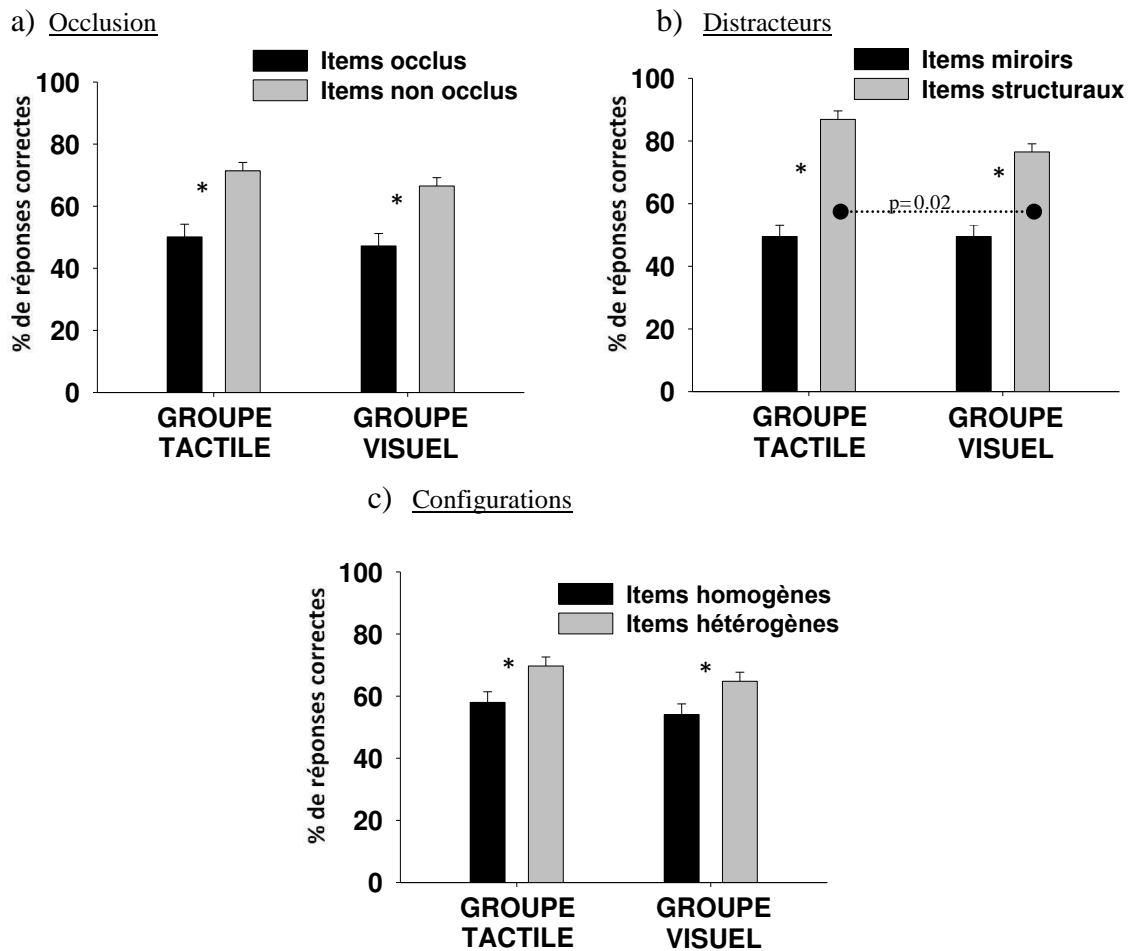


Figure 18. Pourcentages de réponses correctes (avec erreurs types) par facteurs de difficulté a) Occlusion, b) Distracteurs, c) Configurations, par caractéristiques d'items et par modalité sensorielle. *=différences significatives entre caractéristiques d'items.

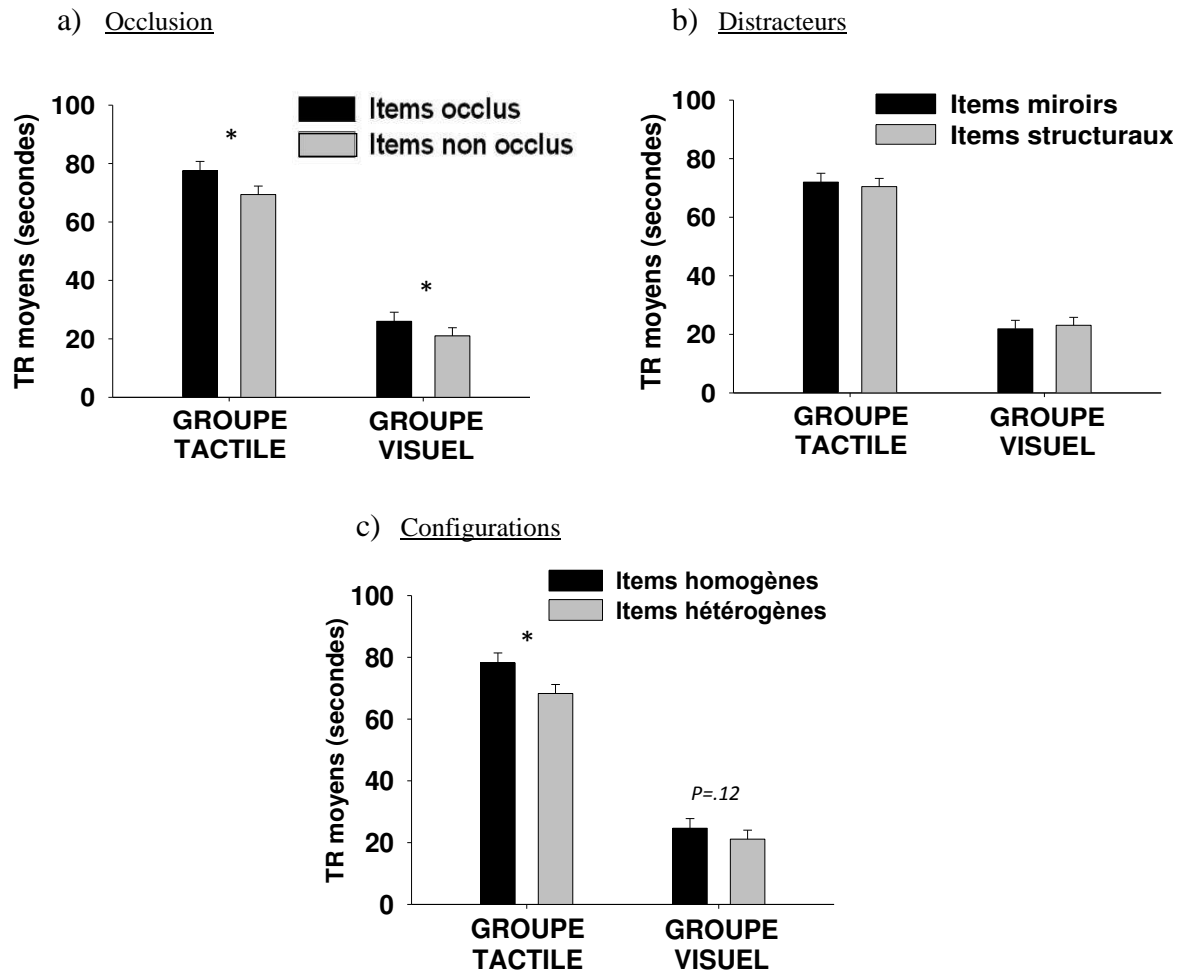


Figure 19. Temps moyens de réponses correctes (avec erreurs types) par facteurs de difficulté a) Occlusion, b) Distracteurs, c) Configurations, par caractéristiques d'items et par modalité sensorielle. *=différences significatives entre caractéristiques d'items.

g) Analyses de validité concomitante par critère externe (EFT) et caractéristiques

Les analyses de validité concomitante, dans les deux modalités sensorielles, ont déjà montré une association entre la mesure d'aptitudes spatiales (EFT) et les pourcentages de réponses correctes au MRT (cf. section d). Une analyse par caractéristiques montre une corrélation significative entre chaque caractéristiques visuelles (%) et le critère externe EFT (visuel : $r > .40$, $p < .05$). Considérant chacune des caractéristiques tactiles, seules les caractéristiques apparaissant comme étant les plus difficiles (cf., section e) sont corrélées significativement aux scores du critère externe EFT (Occlusion, Miroir, Homogène : $r > .32$, $p < .05$; Non occlus, Structural, Hétérogène : $r < .20$, $p > .05$). Les temps moyens de réponses visuelles par caractéristiques ne montrent aucune corrélation significative avec l'EFT (visuel : $r < .078$, $p > .05$), alors qu'une corrélation significative est démontrée entre

les temps moyens tactiles aux items structuraux seulement et les scores à l'EFT (tactile : $r = -.33, p < .05$).

1.3.3. Discussion :

Dans cette deuxième expérience notre objectif était d'évaluer l'aspect général de l'échelle de mesure du MRT. Nous avons dans un premier temps observé des corrélations importantes entre les distributions d'items des MRT visuel et tactile, indiquant une variation commune des erreurs (cohérente) et des temps de réponse (moyennement cohérente). De façon générale, une fiabilité acceptable (seuil d'acceptabilité = 0.60 à 0.70 ; Hair, Anderson, Tatham, & Black, 1998) a été démontrée pour les scores et les temps de réponse. Par contre, les indices de fiabilité tactiles par test-retest se sont montrés légèrement inférieurs aux indices visuels. Une analyse de validité concomitante par critère externe a par ailleurs montré une relation significative entre les scores de l'EFT et les scores des MRT visuel et tactile. Les MRT évalués peuvent ainsi appartenir au même réseau nomologique, définissant des relations similaires avec d'autres échelles d'aptitudes spatiales. De ce point de vue, l'échelle de mesure du MRT n'est pas spécifiquement visuelle, mais plutôt générale. La réussite à des tâches spatiales tactiles peut ainsi prédire la réussite à des tâches spatiales visuelles, et inversement, comme déjà suggéré pour d'autres tâches cognitives plus élémentaires (Stankov et al., 2001 ; Expérience 1a).

Les modèles de difficulté du MRT peuvent aussi être définis comme des modèles généraux. Les résultats des analyses sur les modèles de difficulté ont montré que le traitement via les deux modalités sensorielles donne des patrons d'erreurs quasi identiques. En général, les items non-occlus, structuraux, et hétérogènes, ont été mieux réussis que les items occlus, miroirs, et homogènes, respectivement. Les items structuraux tactiles tendent toutefois à être mieux réussis que leurs semblables visuels. Une meilleure différenciation spatiale des structures locales est ainsi suggérée lorsque le traitement est effectué par la modalité tactile (voir aussi Lakatos & Marks, 1999).

Par ailleurs, les scores composites visuels pour les six caractéristiques d'items, évalués séparément, corréleront significativement avec le score total du critère externe d'aptitudes visuo-spatiales (EFT). En revanche, seuls les scores composites tactiles des caractéristiques d'items plus difficiles corréleront avec les aptitudes visuo-spatiales évaluées par l'EFT. Ces résultats suggèrent une stratégie tactile modulable, en fonction de la difficulté des items du MRT. La nature de cette flexibilité stratégique reste cependant à

définir (i.e., modification endogène de la stratégie tactile de traitement ; élaboration de représentations visuelles vs. représentations spatiales, etc.). Le traitement tactile de haut niveau serait, selon cette analyse, le plus similaire au traitement visuel de haut niveau, concernant la résolution des items difficiles.

Les résultats concernant les modèles de difficulté sont compatibles avec l'hypothèse des descriptions structurales similaires (Reales & Ballesteros, 1999), suggérant des représentations d'objets similaires entre la vue et le toucher. Toutefois, l'absence de transferts significatifs $T \rightarrow V$, telle qu'observée dans l'Expérience 1a, suggère que les patrons de difficulté similaires peuvent dépendre de traitements spécifiques visuel et tactile (i.e., plusieurs routes mènent au même endroit). Ainsi, le traitement tactile ne dépend pas nécessairement de processus visuels, le format des représentations tactiles pouvant être spécifique à la modalité tactile pour certains items du MRT. L'effet modulateur de la difficulté des items, sur les transferts intermodaux au MRT, mérite d'être étudié davantage suivant ces considérations.

Concernant les temps de réponse tactiles, nous démontrons que la résolution correcte des items homogènes (symétriques) prend plus de temps que la résolution des items hétérogènes (asymétriques). Ce résultat correspond à des études sur la perception tactile de la symétrie interne de figures géométriques (Ballesteros et al., 1997 ; Locher & Simmons, 1978 ; Simmons & Locher, 1979). Cet effet ne serait pas nécessairement observé en perception visuelle (Ballesteros & Heller, 2008 ; sauf voir Vigneau et al., sous presse).

Dans les deux modalités sensorielles, nous démontrons que la résolution correcte des items occlus nécessite plus de temps (plus difficile) que la résolution des items non-occlus. Or, lorsque l'on considère l'amalgame des caractéristiques, les items occlus seraient aussi des items homogènes (cf. Tableau 2, p. 47). Il est possible que le facteur de difficulté soit général (deux modalités sensorielles affectées par les configurations homogènes) ou spécifique (le traitement visuel est affecté par l'occlusion alors que le traitement tactile est affecté par la configuration géométrique). Toutefois, des études menées sur le MRT, avec contrôle de l'effet d'occlusion, démontrent un rôle dominant de la configuration homogène pour l'explication des temps de réponse et des différences individuelles de précision au MRT (Caissie et al., 2009 ; Caissie, 2010 ; Vigneau et al., sous presse). Ces résultats, ainsi que les résultats de notre présente étude, suggèrent que l'occlusion visuelle, n'étant pas un facteur de difficulté tactile, ne serait pas le facteur explicatif le plus important de la difficulté et des temps de réponse visuels.

Par ailleurs, une distribution leptokurtique des temps visuels (i.e., regroupement des individus au centre de la distribution) démontre une sensibilité moindre des échelles visuelles, comparativement aux échelles tactiles (i.e., distribution normale). Seuls les temps de réponse aux items structuraux tactiles corrèlent significativement avec les aptitudes spatiales visuelles mesurées par l'EFT. Ce résultat suggère que les temps de réponse tactiles aux items plus faciles peuvent prédire le statut d'un individu en aptitudes spatiales visuelles. Dans le même sens, tel qu'exposé dans l'Expérience 1a (analyse des compromis vitesse-précision tactiles, voir note de bas page 7, p. 57), les participants plus rapides obtiennent des scores plus élevés au MRT tactile. La vitesse est donc sujette aux différences individuelles dans le contexte de tâche tactile. Elle pourrait éventuellement servir de prédiction pour les aptitudes spatiales en général. Elle mérite d'être étudiée davantage.

En somme, les deux tests offrent des échelles psychométriques très similaires, les plus grandes similarités étant observées pour les modèles de difficulté basés sur les caractéristiques d'items. Les difficultés et les temps de réponse tactiles et visuels sont influencés par les mêmes caractéristiques d'items. Nous pouvons donc conclure que l'échelle de mesure du MRT est plutôt générale. Les résultats démontrent néanmoins une particularité pour la modalité tactile, concernant le changement possible de stratégies selon la difficulté des items présentés (i.e., relation aux aptitudes spatiales visuelles pour des items plus difficiles seulement). Le fait que nous n'ayons pas observé de transfert T→V significatif dans l'Expérience 1a suggère par ailleurs que les résultats visuel et tactile similaires dépendent de traitements spécifiques pour certains items. Néanmoins, le MRT tactile peut être considéré comme un test des différences individuelles en aptitudes spatiales, dont le domaine d'intérêt est en partie similaire au domaine des aptitudes spatiales visuelles. A l'expérience 1c, nous évaluerons l'effet modulateur de la difficulté des items sur les transferts intermodaux. Nous pourrions ainsi mieux définir l'étendue des spécificités sensorielles pour différentes caractéristiques des items du MRT.

1.4. EXPERIENCE 1c : Effet modulateur de la difficulté sur les transferts intermodaux au Test des Rotations Mentales.

Une analyse générale des transferts intermodaux, dans l'Expérience 1a, a suggéré l'indépendance sensorielle des représentations au Test des Rotations Mentales (voir aussi Toussaint, Caissie, et al., 2012). De ce point de vue, le traitement spécifique via les récepteurs sensoriels visuel et tactile contribuerait au développement de représentations multisensorielles. L'Expérience 1b, sous forme d'analyses d'échelles, confirme l'aspect général de la mesure du MRT. Les caractéristiques d'items sont déterminantes, pouvant causer des patrons d'erreurs (et de temps de réponse) similaires, indépendamment de la modalité sensorielle évaluée. Par contre, en condition intermodale (T→V) nous n'observons aucun transfert tactile significatif pour le traitement visuel (Expérience 1a). La résolution de certains items en session 1 peut ainsi dépendre de traitements spécifiques à la modalité sensorielle utilisée, visuelle ou tactile.

Dans l'Expérience 1b, nous avons observé des corrélations significatives entre les scores composites de précision des items tactiles plus difficiles et les aptitudes spatiales visuelles en général (Expérience 1b). Ces analyses de validité suggèrent que la difficulté détermine l'importance des transferts intermodaux au MRT, la résolution (ou le traitement) des items difficiles pouvant le plus dépendre de processus tactiles de haut niveau similaires aux processus visuels de haut niveau. Dans cette expérience, nous évaluerons ainsi l'effet modulateur de la difficulté des items sur les transferts intermodaux pour deux modèles (1. Distracteurs : items difficiles miroirs vs. items faciles structuraux et 2. Occlusion-Configuration¹² : items difficiles occlus-homogènes vs. items faciles non-occlus-hétérogènes).

Concernant la résolution ou le traitement des items difficiles, des chercheurs s'accordent sur la nécessité d'une représentation visuelle des formes globales d'objets (Caissie et al., 2009 ; Voyer et al., 2004 ; Voyer & Hou, 2006).

Notamment, la résolution des items miroirs visuels nécessiterait une rotation mentale effectuée sur les représentations d'objets identiques (Shiina & Suzuki, 1999 ;

¹² Une forte corrélation entre % d'items visuels occlus et % d'items visuels homogènes a déjà été observée (Caissie *et al.*, 2009). Une analyse complémentaire corrélationnelle non rapportée dans l'Expérience 1b montre aussi pour tous les groupes une forte corrélation entre les % de réponses correctes d'items occlus et les % de réponses correctes d'items à configuration homogène ($r > .89$, $p < .000$). Dans cette étude, ces caractéristiques offrent donc la même contribution à la difficulté du MRT, définissant les mêmes items ou presque (items occlus=9, 10, 11, 14 ; items homogènes=9, 10, 11, 13, 14). Dans l'Expérience 1c, afin d'éviter la redondance des facteurs de difficulté en question, ces caractéristiques résument un modèle « d'occlusion-configuration » incluant les items à configuration homogène avec occlusion : 9, 10, 11 et 14.

Voyer & Hou, 2006), alors que pour les items structuraux, l'utilisation d'une stratégie spatiale serait suffisante (Geiser et al., 2006 ; Shiina & Suzuki, 1999). Pour les items structuraux, un participant doit simplement percevoir une différence spatiale des structures locales des distracteurs d'items.

De même, l'asymétrie interne des objets à configuration hétérogène serait plus rapidement représentée, la résolution des items hétérogènes ne nécessitant pas le développement de représentations visuelles globales des objets. En revanche, la résolution des items homogènes peut nécessiter le développement de représentations visuelles globales des objets symétriques (Caissie et al., 2009 ; Vigneau et al., sous presse).

Etant fortement réussis à la session 1 (structuraux : >75% ; hétérogènes : >70% ; cf. Tableau 7, p. 82), les items faciles n'occasionneraient pas de transferts significatifs de précision à la session 2. Les représentations développées pour les items faciles ne dépendraient pas d'une modalité sensorielle en particulier. Si le traitement tactile des items plus difficiles dépend de l'implication de processus visuels, ou de processus multisensoriels, à la session 1, nous pourrions alors le démontrer par des transferts intermodaux tactiles significatifs dans le traitement des items difficiles visuels, lors de la deuxième session. En revanche, l'asymétrie des transferts intermodaux de précision, favorisant l'apport de l'expérience visuelle pour le traitement tactile (groupe V-T), pourra suggérer l'utilité de représentations visuelles dans le traitement des items difficiles tactiles. Par ailleurs une telle asymétrie des transferts intermodaux pourra suggérer un traitement spécifique tactile et visuel lors de la première session. Par la vue, les formes globales des objets seraient mieux représentées (Lakatos & Marks, 1999). Ces représentations seraient aussi mieux transférées dans une condition subséquente tactile. Cependant, nous n'attendons pas d'effet particulier des caractéristiques d'items sur les transferts intermodaux des temps de réponse (cf. Expérience 1a). Une diminution des temps moyens de réponse sera plus importante en condition intramodale, peu importe la nature des items. Pour toutes analyses, une spécificité sensorielle sera suggérée par l'inégalité des transferts intermodaux et intramodaux. Partant de ces prédictions, nous pourrions définir l'étendue des spécificités sensorielles pour différents items du MRT.

1.4.1. Méthode :

Quatre-vingt treize participants ont été retenus pour ces analyses, tels que décrits dans la section méthode de l'Expérience 1a. Rappelons que les participants ont été divisés

en 4 groupes (voir Tableau 3, p. 53). Ils ont effectué deux tâches consécutives du MRT (session 1 et session 2) sans temps limite, en condition intramodale (Groupes V-V et T-T) ou en condition intermodale (Groupes T-V et V-T). Les mêmes 14 items étaient administrés dans les deux tâches sensorielles, pour les deux sessions consécutives. Dans l'expérience 1c, nous représentons les items selon deux modèles de difficulté (Distracteurs et Occlusion-Configuration).

a) Analyse des données :

Les pourcentages de réponses correctes tels que définis dans l'Expérience 1a ont été retenus pour les analyses. Les données temporelles extrêmes intra-individuelles ont été enlevées des analyses selon un seuil critère de +2 écart-types (2.9% des données). L'analyse des temps moyens de réponse aux items du MRT (visuel et tactile) a été menée sur les items corrects uniquement (69% total des deux sessions 1 et 2).

Des scores composites, sous forme de pourcentages de réponses correctes, ainsi que les temps moyens de réponses, ont été calculés pour chacune des caractéristiques des modèles à l'étude (Modèle Distracteurs et Modèle Occlusion-Configuration). Chaque modèle de difficulté définit deux caractéristiques ou regroupements de caractéristiques : 1. Items miroirs (1, 2, 5, 6, 9, 10, 11, 12) vs. Items structuraux (3, 4, 7, 8, 13, 14), et 2. Items occlus-homogènes (9, 10, 11, 14) vs. Items non-occlus-hétérogènes (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12). Des ANOVAs ont été menées séparément par modèle de difficulté, sur les taux de changement (TC). Les TC ont été définis selon les méthodes de l'Expérience 1a, et calculés par caractéristiques des modèles de difficulté. Lorsque l'on considère les scores de précision, un TC négatif exprime une augmentation du pourcentage de réponses correctes, lors de la deuxième session, alors qu'un TC positif exprime une diminution. Lorsque l'on considère les temps de réponse, un TC négatif exprime une détérioration de la performance (temps de réponse plus long en session 2), alors qu'un TC positif exprime une amélioration de la performance (temps de réponse plus court en session 2).

Les TC correspondant au pourcentage de réponses correctes et au temps de réponse ont été soumises à des ANOVAs à 2 Modalités (visuelle vs. tactile) x 2 Conditions (intermodale vs. intramodale) x 2 Caractéristiques d'items (Items miroirs vs. Items structuraux ou Items occlus-homogènes vs. Items non-occlus-hétérogènes). Les résultats significatifs à $p < .05$ ont été rapportés, ainsi que des analyses post-hoc (Test de Newman-Keuls, avec corrections de Bonferonni) le cas échéant. Des analyse par test-t de Student

sont aussi rapportées concernant les TC par groupes, par caractéristiques d'items, avec corrections de Bonferonni. Bien que le facteur groupe ne soit pas inclus dans les ANOVAs, l'analyse complémentaire par test-t de Student est informative pour comprendre l'importance des transferts, par groupe, par rapport aux niveaux de base.

1.4.2. Résultats :

- a) Analyse des TC sur les pourcentages de réponses correctes par modèles de difficulté

Modèle Distracteurs

Les pourcentages de réponses correctes des modèles, à la session 1 et à la session 2, ainsi que les TC par groupe sont rapportés dans le Tableau 7 (p. 82). Pour les TC du modèle Distracteurs, l'ANOVA ne révèle pas d'effet principal de la Modalité, de la Condition, ni d'interaction ($F < 3.6$). L'analyse des TC révèle cependant un effet principal de la Caractéristique d'item, $F(1,86)=36.02$, $\eta_p^2=0.29$, une interaction entre la Caractéristique d'item et la Modalité, $F(1,86)=5.24$, $\eta_p^2=0.06$, et une interaction entre les facteurs Caractéristique d'item, Modalité et Condition, $F(1,86)=5.1$, $\eta_p^2=0.055$, $ps < .05$. Cette dernière interaction permet de comparer chacun des groupes par des tests Newman-Keuls. Dans le groupe V-T uniquement, une amélioration significativement plus importante des scores de précision apparaît pour les items miroirs comparés aux items structuraux ($p < .0125$). Cette amélioration pour les items miroirs dans le groupe V-T est significativement plus importante comparativement aux résultats du groupe T-V seulement ($p < .0125$) (Figure 20, p. 80).

Des analyses par test-t de Student nous permettent de montrer qu'aucun groupe n'améliore significativement les pourcentages de réponses correctes des items structuraux de la session 1 à la session 2, $ts < -0.37$, $ps > .22$. Pour les items miroirs, les TC des groupes V-T, T-T, et V-V diffèrent significativement de zéro, $ts > -3.17$, $ps < .004$, alors que le TC du groupe T-V ne diffère pas significativement de zéro, $t(22)=-1.4$, $p=.18$. Ces résultats montrent que les conditions intramodales (V-V et T-T), ainsi que la condition intermodale avec une expérience visuelle préalable (V-T), sont favorables à l'amélioration des scores de précision, ce qui n'est pas le cas lorsque l'expérience préalable en condition intermodale concerne la modalité tactile (T-V). Dans le cadre de cette expérience, un TC de -16.5 %

équivalait une amélioration moyenne de + 1 item miroir réussi à la session 2 par rapport aux résultats en session 1. Ainsi, les groupes V-T, T-T, T-V, et V-V s'améliorent en moyenne, respectivement, de 3.35, 1.7, 0.94, et 1.84 item(s) miroirs réussis.

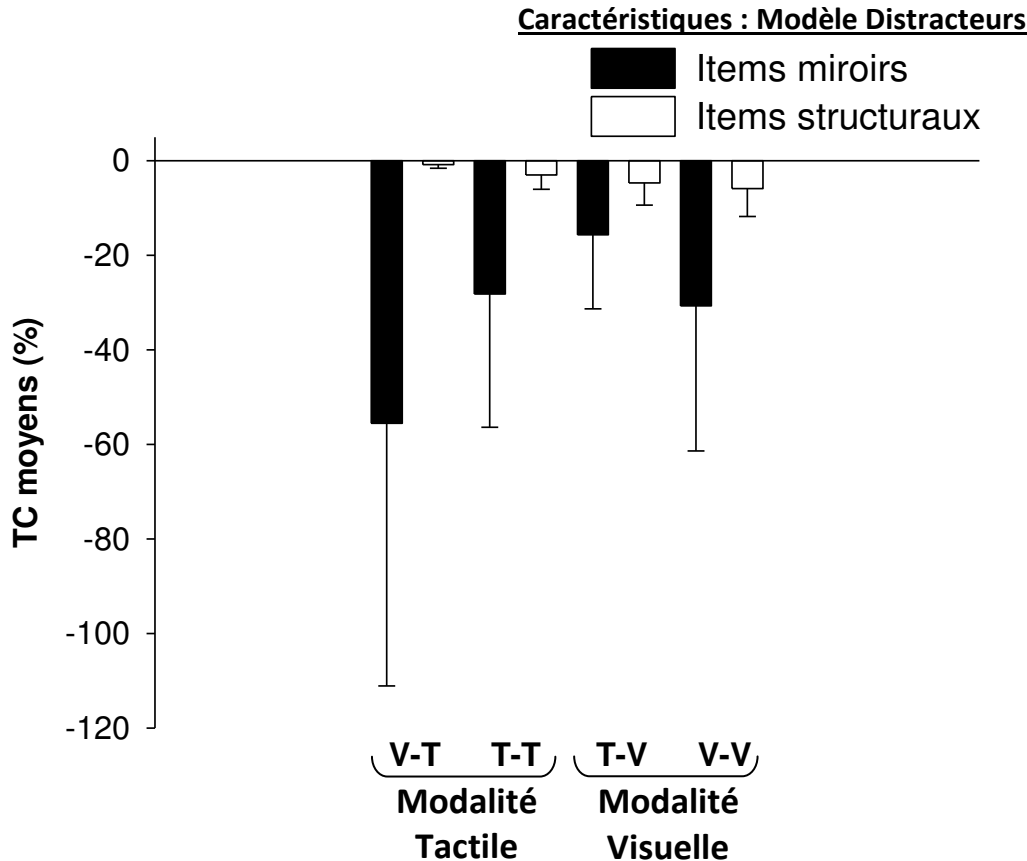


Figure 20. TC des scores de précision (avec écarts-types) ; Modèle Distracteurs. Taux de changement moyens par caractéristiques d'items, par modalité, et par condition (intermodale : V-T et T-V ; intramodale : T-T et V-V). Rappel : un TC négatif traduit une amélioration du score de précision de la session 1 à la session 2.

Modèle Occlusion-Configuration

Pour les TC du modèle Occlusion-Configuration, l'ANOVA révèle un effet principal de la Modalité, $F(1,83)=4.65$, $\eta_p^2=0.05$, et une interaction significative entre Modalité et Condition, $F(1,83)=4.24$, $\eta_p^2=0.048$, $ps<.05$. Selon les tests de Newman-Keuls, le groupe V-T obtient un TC supérieur au groupe T-V ($p<.0125$). L'analyse des TC révèle aussi un effet principal de la Caractéristique d'item, $F(1,83)=12.2$, $\eta_p^2=0.13$, une interaction significative entre Caractéristique d'item et Condition, $F(1,83)=3.8$, $\eta_p^2=0.044$, ainsi qu'une interaction entre Caractéristique d'item, Modalité et Condition, $F(1,83)=3.7$, $\eta_p^2=0.042$, $ps<.05$. Cette dernière interaction permet de comparer chacun des groupes par

des tests Newman-Keuls. Seul le groupe V-T, avec expérience préalable visuelle, présente une amélioration significativement plus élevée pour les items occlus-homogènes comparés aux items non-occlus-hétérogènes ($p=.0004$). Cette valeur élevée du TC dans le groupe V-T diffère significativement de celles des autres groupes ($p<0.005$) (Figure 21, p. 81).

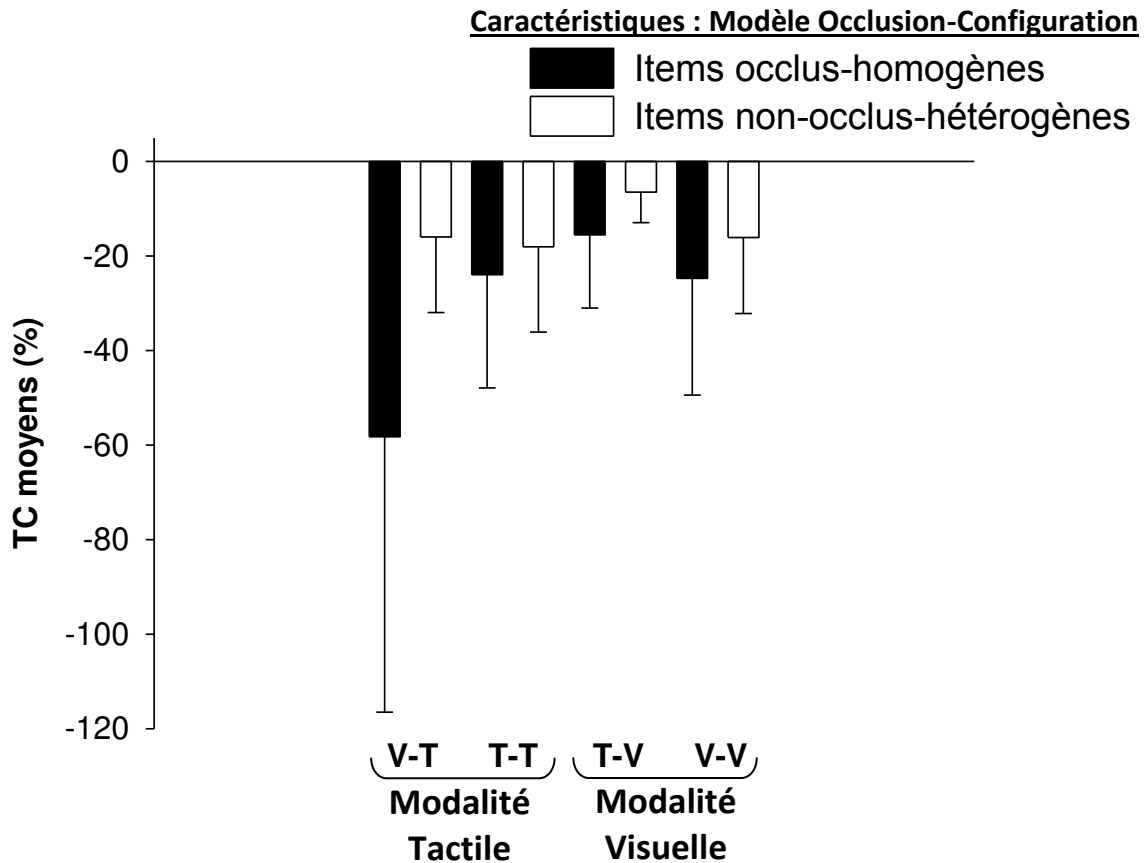


Figure 21. TC (%) des scores de précision (avec écarts-types) ; Modèle Occlusion-Configuration. Taux de changement moyens par caractéristiques d'items, par modalité et par condition (intermodale : V-T et T-V ; intramodale : T-T et V-V). Rappel : un TC négatif traduit une amélioration du score de précision de la session 1 à la session 2.

Des analyses par test-t de Student, pour les TC d'items non-occlus-hétérogènes nous permettent de montrer que les groupes V-T, T-T, et V-V s'améliorent significativement, en session 2 (TC différents de zéro, $t_s > -3.94$, $p_s < .0125$), ce qui n'est pas le cas pour le groupe T-V ($t(22) = -1.4$, $p > .14$). Pour les TC d'items occlus-homogènes, seuls les participants du groupe V-T s'améliorent significativement ($t(21) = -5.97$, $p < .0125$) alors que les participants des groupes intramodaux (T-T et V-V) tendent seulement, après correction Bonferonni, à l'amélioration ($t_s \leq -2.5$, $p \geq .02$). Ainsi, les conditions intramodales (V-V et T-T) et la condition intermodale avec une expérience visuelle préalable (V-T) sont les plus favorables à l'amélioration des scores de précision, ce qui n'est pas le cas en

condition intermodale lorsque l'expérience préalable est de nature tactile (T-V). Dans le cadre de cette expérience, un TC de -11% équivaut une amélioration moyenne de + 1 item non-occlus-hétérogène à la session 2 par rapport aux résultats en session 1. Ainsi, les groupes V-T, T-T, T-V, et V-V s'améliorent en moyenne, respectivement, de 1.44, 1.62, 0.58, et 1.44 item(s) non-occlus-hétérogènes réussis. Un TC de -25% équivaut une amélioration moyenne de + 1 item occlus-homogène à la session 2 par rapport aux résultats en session 1. Ainsi, les groupes V-T, T-T, T-V, et V-V s'améliorent en session 2, respectivement, de 2.32, 0.95, 0.62, et 0.98 item(s) occlus-homogènes en moyenne.

Tableau 7. Pourcentage de réponses correctes (avec écarts-types) à la session 1 et à la session 2, taux de changement (TC) (avec écarts-types), par groupes et par caractéristiques d'items. a) Modèle Distracteurs ; b) Modèle Occlusion-Configuration.

a) Modèle Distracteurs*

Caractéristiques		Session 1	Session 2	TC
Groupe T-T	S	89% (15)	91.3% (14.5)	- 3% (16.4)
	M	55% (27.7)	70.5% (24.4)	- 28.2% (44.4)
Groupe V-V	S	77.3% (19.6)	81.8% (16.9)	- 5.9 % (22)
	M	50% (20.7)	65.3% (20.3)	- 30.7% (40.8)
Groupe V-T	S	78.9% (18.2)	86.9% (18.8)	- 1.3% (17)
	M	55.9% (21.2)	72.3% (24.1)	- 52% (42)
Groupe T-V	S	87.7% (17.5)	81.8% (15.8)	- 4.8% (20.2)
	M	43.2% (21.1)	58.7% (30)	- 15.7% (52.4)

b) Modèle Occlusion-Configuration*

Caractéristiques		Session 1	Session 2	TC
Groupe T-T	NO-HET	74.4% (16.3)	84.8% (15.5)	- 16.5 % (17.2)
	O-HOM	57% (31)	66% (30.5)	- 20.6 % (48.8)
Groupe V-V	NO-HET	67.3% (14.8)	78.6% (14.2)	- 16.9 % (21.2)
	O-HOM	47.7% (23)	56.8% (24.6)	- 24.7 % (45.3)
Groupe V-T	NO-HET	73.5% (18.2)	80.4% (17.7)	- 14.5 % (19.6)
	O-HOM	46.7% (26.4)	73.9% (26.6)	- 55.6 % (43.6)
Groupe T-V	NO-HET	69.9% (18.8)	75.2% (22.1)	- 6.8 % (31.4)
	O-HOM	42.2% (22.7)	52.2% (24.9)	- 15.5 % (48)

*Note : M=miroir ; S=structural ; HET=hétérogène ; HOM=homogène ; NO=non-occlus ; O=occlus.

b) Analyse des TC sur les temps de réponses par modèles de difficulté

Modèle Distracteurs

Pour les TC des temps de réponses du modèle Distracteurs, l'ANOVA révèle un effet principal de la Modalité, $F(1,85)=7.3$, $\eta_p^2=0.08$, et de la Condition, $F(1,85)=11.08$,

$\eta_p^2=0.12$, $p<.05$, sans interaction entre ces facteurs ($F<1$). Comparée au MRT visuel, la réalisation du MRT tactile s'accompagne d'une amélioration de la performance (diminution des temps de réponse) plus forte en session 2. De plus, l'amélioration de la performance est également plus marquée en condition intramodale qu'en condition intermodale (Figure 22, p. 83).

L'analyse des TC révèle aussi une interaction significative entre les facteurs Caractéristique d'item et Modalité, $F(1,85)=15.86$, $p<.05$, $\eta_p^2=0.16$. Cette dernière interaction permet de comparer les deux modalités sensorielles, par des tests de Newman-Keuls. Selon les analyses post-hoc, les groupes en modalité tactile (session 2) s'améliorent davantage que les groupes en modalité visuelle en ce qui concerne les items miroirs ($p=.0008$).

Après correction de Bonferonni, les analyses par test-t de Student ne nous permettent pas de montrer d'amélioration des temps de réponses aux items structuraux, avec tendances des groupes V-T ($t(21)=-2.09$, $p=.048$) et T-T ($t(23)=2.30$, $p=.03$). Pour les items miroirs, seuls les temps de réponse du groupe T-T diminuent significativement ($t(24)=8.98$, $p<.0125$). Nous n'observons pas d'amélioration pour le groupe T-V.

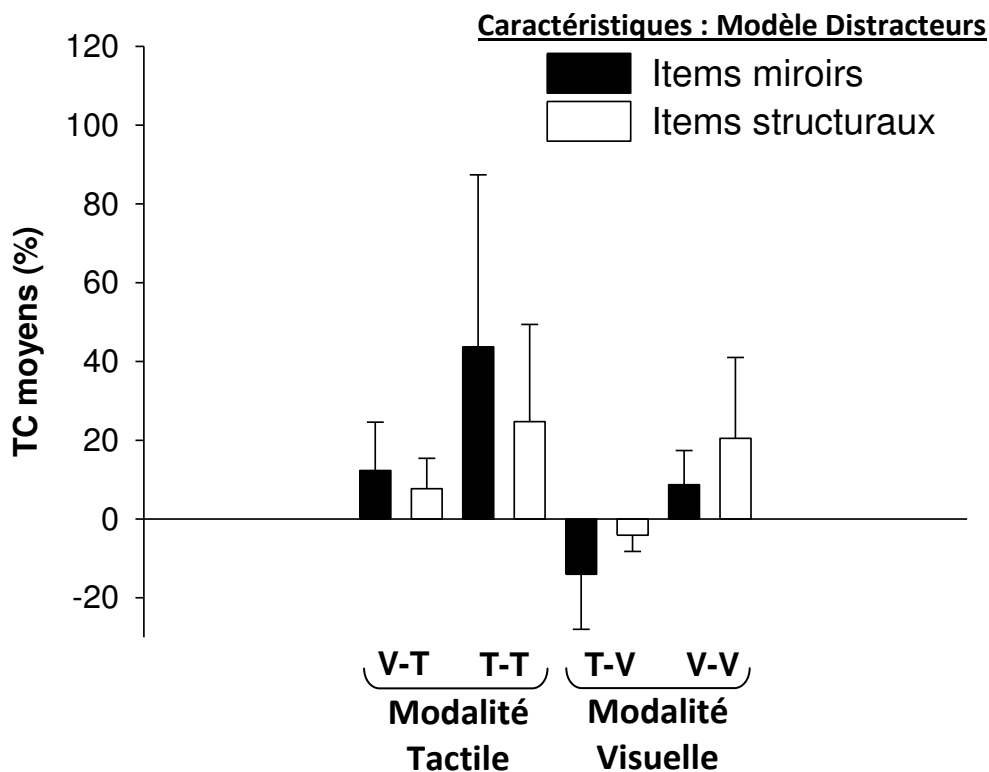


Figure 22. TC (%) des temps de réponses (avec écarts-types) ; Modèle Distracteurs. Taux de changement par caractéristiques d'items, par modalité de tâche et par condition (intermodale : V-T et T-V ; intramodale : T-T et V-V). Rappel : un TC positif traduit une amélioration de la performance, c'est-à-dire une diminution des temps de réponse de la session 1 à la session 2.

Modèle Occlusion-Configuration

Pour les TC des temps de réponses du modèle Occlusion-Configuration, l'ANOVA révèle seulement un effet principal de la Modalité, $F(1,82)=5.8$, $p<.05$, $\eta_p^2=0.06$, et un effet tendanciel de la Condition, $F(1,82)=3.6$, $p=.059$, $\eta_p^2=0.04$, sans interaction entre ces facteurs ($F<1$). Les groupes en modalité tactile obtiennent des TC supérieurs aux groupes en modalité visuelle. Les groupes en condition intramodale tendent à de plus fortes améliorations que les groupes en condition intermodale (Figure 23).

Les analyses TC ne révèlent aucun effet principal de la Caractéristique d'item, ni d'interaction avec les autres facteurs ($F<1$). Les analyses par test-t de Student nous permettent de montrer qu'aucun groupe ne diminue significativement les temps de réponse aux items non-occlus-hétérogènes ($ts<1.51$, $p>0.0125$). Seuls les participants des groupes T-T, V-V et V-T diminuent significativement leurs temps de réponses aux items occlus-homogènes ($ts>4.04$, $p<.0125$). Nous n'observons pas d'amélioration pour le groupe T-V.

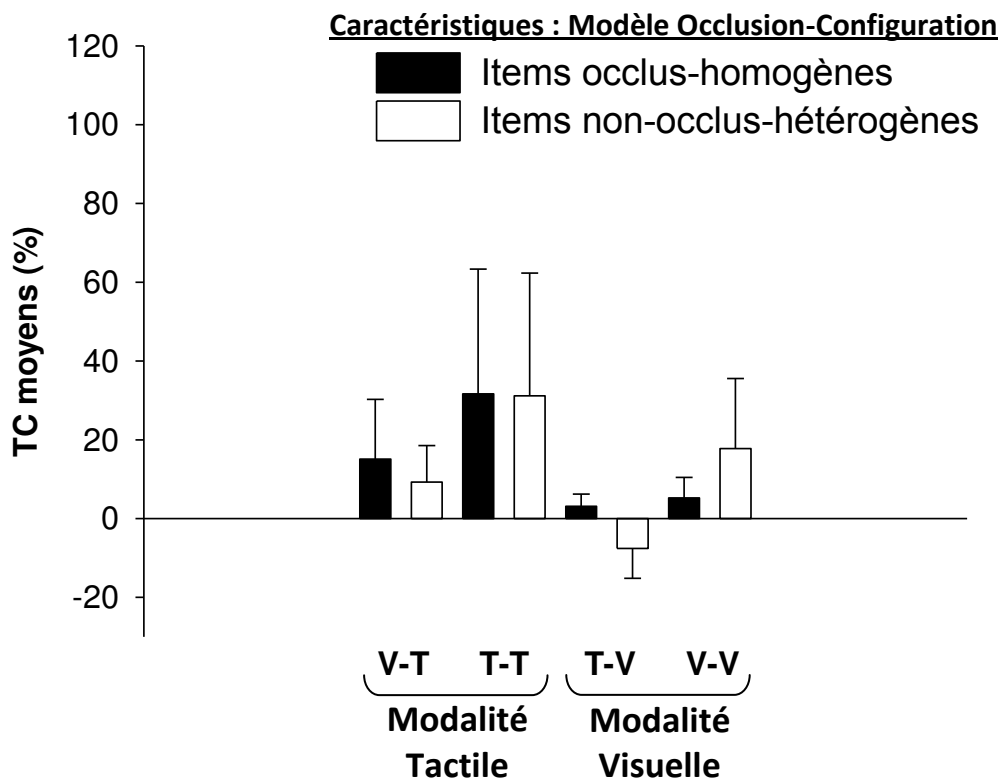


Figure 23. TC (%) des temps de réponses (avec écarts-types) ; Modèle Occlusion-Configuration. Taux de changement par caractéristiques d'items, par modalité de tâche et par condition (intermodale : V-T et T-V ; intramodale : T-T et V-V). Rappel : un TC positif traduit une amélioration de la performance, c'est-à-dire une diminution des temps de réponse de la session 1 à la session 2.

1.4.3. Discussion :

Dans l'Expérience 1c, notre objectif était d'évaluer l'étendue des spécificités sensorielles au MRT. L'effet modulateur de la difficulté sur les transferts intramodaux et intermodaux a été analysé pour différentes caractéristiques d'items. Comme dans l'Expérience 1a, nous interprétons les taux de changement (TC) de la précision et des temps de réponse séparément.

Des scores de précision élevés pour les items faciles aux tâches visuelles et tactiles, à la première session, suggéraient déjà une indépendance sensorielle, malgré des traitements visuels et tactiles différenciés (i.e., items structuraux et items non-occlus-hétérogènes). Selon nos prédictions, l'explication générale des améliorations de précision en conditions inter – et intra – modales pouvait résulter des performances aux items les plus difficiles. Par contre, nos résultats offrent une conclusion atténuée, la difficulté n'ayant pas nécessairement le même effet sur les transferts, selon le groupe ou la condition sensorielle préalable.

Nous avons observé des améliorations importantes de la précision aux items difficiles en condition intermodale avec expérience visuelle préalable (groupe V-T, items occlus-homogènes), étant toutefois similaires aux améliorations observées dans les conditions intramodales lorsque l'on considère les items miroir. C'est aussi dans cette condition que nous observons des TC pour les items difficiles plus importants que les TC pour les items faciles, ce qui suggère un effet isolé de la difficulté sur les TC de précision. A l'inverse, une expérience préalable tactile (groupe T-V) ne présente pas d'avantage particulier en ce qui a trait à l'amélioration du score de précision visuel. Les informations issues d'une expérience tactile ne sont donc pas réutilisables en condition visuelle, pour les deux modèles d'items étudiés (1. Distracteurs et 2. Occlusion-Configuration).

L'asymétrie des transferts intermodaux démontre un avantage de l'expérience visuelle, bien que minime, lorsque les participants traitent les informations tactiles des items nécessitant un encodage et une représentation des formes globales : les items miroirs et les items occlus-homogènes (Voyer & Hou, 2006 ; Voyer et al., 2004 ; Caissie et al., 2009). De plus, l'expérience préalable visuelle, intégrée au traitement tactile, occasionne la meilleure combinaison ou synthèse des représentations pouvant découler des deux modalités sensorielles (Visuelle → Tactile ; Helbig & Ernst, 2007). Toutefois nous devons considérer que la grande variabilité inter-individuelle des transferts de précision, dans le groupe V-T, réduit la portée et l'importance de ce résultat.

Par ailleurs, nous démontrons que tous les participants (sauf les participants du groupe T-V) s'améliorent significativement aux items miroirs, occlus-homogènes et non-occlus-hétérogènes. L'impossibilité de réutiliser les informations tactiles en condition visuelle confirme une spécificité des représentations tactiles lors du traitement de ces trois caractéristiques d'items à la première session. Néanmoins, aucun participant ne s'améliore aux items structuraux. En l'occurrence, nous pouvons suggérer un effet plancher pour cette caractéristique (précision déjà fort élevée en session 1). L'exploration dans les deux modalités sensorielles permet ainsi aux participants de trouver les différences structurales, locales, sur les distracteurs (Lakatos & Marks, 1999), et ce, sans dépendance (ou spécificité) sensorielle importante.

En général, une diminution des temps de réponse démontre que les processus de traitement moins pertinents diminuent de la session 1 à la session 2 (Richard et al., 2004). Les participants assimilent alors les règles d'items, pour se concentrer sur les aspects ou segments des objets les plus importants pour la résolution des items du MRT. L'analyse des TC pour les temps de réponse montre des effets similaires de la difficulté, lorsque nous comparons les deux modèles. Ainsi, nous démontrons de plus fortes diminutions de temps aux items difficiles miroirs pour la modalité tactile (session 2), comparativement à la modalité visuelle. Seul le groupe T-T diminue significativement les temps de réponse des items miroirs, de la session 1 à la session 2. Allant à l'encontre de nos prédictions, un groupe en condition intermodale, V-T, s'améliore significativement, et autant que les groupes intramodaux T-T V-V, aux items occlus-homogènes. Contrairement aux résultats de l'Expérience 1a, ce dernier résultat démontre qu'une expérience visuelle préalable peut occasionner un changement des processus de traitement tactiles. L'effet sur les temps de réponse suggère que l'expérience visuelle, intégrée, motive une analyse tactile plus ciblée des items à configurations homogènes. En revanche, comme dans le cas des analyses de précision, une expérience tactile préalable ne semble pas influencer les temps de réponse visuels.

En somme, les résultats de cette expérience nous incitent à reconsidérer la conclusion générale d'une indépendance sensorielle des représentations de haut niveau, telle qu'exposée dans l'Expérience 1a. L'analyse des transferts, lorsque l'on tient compte de la difficulté des items, montre en effet que l'expérience tactile n'influence pas la précision et les temps de réponse visuels, que les items soient faciles ou difficiles. Nous pouvons alors confirmer une spécificité du traitement tactile au MRT, sauf lorsque l'expérience visuelle précède le traitement tactile. Néanmoins, les deux modalités

sensorielles permettent des performances similaires à la première session, par caractéristiques d'items (i.e., Expérience 1b). Or, ces performances similaires dépendraient de représentations spécifiques et de processus de traitements spécifiques, le traitement tactile et le traitement visuel pouvant appartenir à des domaines spécifiques. Le MRT n'est, de ce point de vue, pas nécessairement visuel et pas nécessairement multisensoriel. A la première session, les différents items n'évaluent pas nécessairement les mêmes aptitudes (i.e., rotation mentale, aptitudes spatiales) selon leur difficulté, et selon la modalité sensorielle utilisée par les participants¹³.

¹³ Une étude expérimentale, menée conjointement avec un laboratoire canadien (F. Vigneau, Ph.D.), permet d'évaluer l'effet de différentes caractéristiques du MRT sur la difficulté visuelle. Chaque caractéristique est représentée, sans amalgame, dans des versions complémentaires du MRT. Les nouvelles versions développées dans cette étude pourront être transformées en versions tactiles pour vérifier l'effet des caractéristiques d'items, évaluées séparément, sur le traitement d'information visuel et tactile et les transferts intermodaux.

1.5. Conclusion de l'Expérience 1

Cette première expérience avait comme objectif d'évaluer les similarités et les dissimilarités entre performances visuelles et tactiles au Test des Rotations Mentales (MRT) au moyen d'un paradigme de transferts intermodaux. L'articulation d'approches expérimentales (1a et 1c) et psychométrique (1b) nous a permis de démontrer des performances visuelles et tactiles similaires, étant néanmoins dépendantes de représentations spécifiques, et de processus de traitements spécifiques, lors de la résolution des items du MRT.

Dans l'Expérience 1a, nous avons évalué les transferts intermodaux sur les scores de précision et les temps moyens de réponse. Nos résultats ont suggéré l'équivalence des conditions intermodales et intramodales pour la précision. De ce point de vue, les représentations de haut niveau au MRT seraient multisensorielles, leur élaboration étant toutefois dépendante d'un traitement spécifique à la modalité sensorielle utilisée. Nous avons notamment observé de fortes corrélations entre les scores de précision visuelle et tactile. Toutefois, le transfert de précision en condition intermodale T-V ne s'est pas avéré significatif, ce qui pouvait aussi suggérer l'utilisation de représentations tactiles et visuelles spécifiques. Dans l'Expérience 1b, notre étude psychométrique a démontré que les difficultés et les temps de réponse dépendent des mêmes caractéristiques d'items du MRT dans les deux modalités sensorielles. De plus, les deux MRT appartiennent au même réseau nomologique de mesure en aptitudes spatiales, la précision tactile aux items difficiles et les temps de réponse tactiles aux items faciles pouvant prédire le statut d'un individu en aptitudes spatiales visuelles.

Ces deux premières approches valident en partie l'hypothèse des descriptions structurales similaires (Reales & Ballesteros, 1999), le MRT présentant une échelle de mesure générale. Toutefois, l'approche exposée dans l'Expérience 1c, lorsque l'on tient compte de la difficulté des items du MRT, a confirmé l'impossibilité des transferts tactiles en condition visuelle, que les items soient faciles ou difficiles. En condition intermodale, seule l'expérience visuelle améliore le traitement tactile pour les items nécessitant une représentation de formes globales (i.e., occlus-homogènes : précision et temps) et une rotation mentale (i.e., miroirs : précision). Par ailleurs, l'étude des transferts démontre que la résolution des items faciles structuraux ne dépend pas d'une modalité sensorielle spécifique (i.e., stratégie spatiale) et que le traitement des items miroirs, homogènes et hétérogènes est spécifique de la modalité sensorielle utilisée. Suite à cette première étude,

nous pouvons donc conclure que la résolution des items du MRT ne dépend pas nécessairement d'une représentation visuelle ou de processus de traitement visuels. Au Tableau 8, nous résumons les résultats des transferts inter – et intra – modaux dans notre expérience.

Tableau 8 : Schéma des différentes conditions de transfert et résultats obtenus dans les expériences - 1a et 1c - avec le Test des Rotations Mentales.

Expérience 1a	Comparaison des transferts	Conclusion (ANOVA)
% de réponses correctes	$V-V = T-T = V-T = T-V^*$	Indépendance sensorielle
Temps de réponses	$V-V = T-T > V-T^* = T-V^*$	Spécificité de traitement

Expérience 1c	Comparaison des transferts	Conclusion (ANOVA)
% de réponses correctes Items structuraux	$V-V^* = T-T^* = V-T^* = T-V^*$	Indépendance sensorielle
% de réponses correctes Items miroirs	$V-T > V-V = T-T = T-V^*$	Avantage de l'expérience visuelle en condition intermodale
% de réponses correctes Items non-occlus-hétérogènes	$V-V = T-T = V-T = T-V^*$	Indépendance sensorielle
% de réponses correctes Items occlus-homogènes	$V-T > V-V = T-T = T-V^*$	Avantage de l'expérience visuelle en condition intermodale
Temps de réponses Items structuraux	$V-V = T-T = V-T^* = T-V^*$	Indépendance sensorielle
Temps de réponses Items miroirs	$(V-T^* + T-T) > (V-V^* + T-V^*)$	Diminution plus forte des temps de réponse avec modalité tactile
Temps de réponses Items non-occlus-hétérogènes	$V-V = T-T = V-T^* = T-V^*$	Indépendance sensorielle
Temps de réponses Items occlus-homogènes	$V-V^* = T-T = V-T = T-V^*$	Indépendance sensorielle

*Conclusion test-t : transferts non-significatifs (= 0%)

Comme déjà noté, le MRT est constitué de plusieurs types d'items. L'interprétation des résultats, concernant spécifiquement la nature des transferts, peut être difficile. Notamment, notre première expérience n'a pas permis de distinguer les processus relatifs à l'encodage des informations et les processus relatifs à la manipulation mentale des informations. Pour évaluer les similarités/dissimilarités intersensorielles des représentations développées (et leur manipulation mentale), une approche différente est nécessaire. L'étude des transferts à partir d'une tâche élémentaire de rotation mentale est ainsi présentée dans les expériences 2a et 2b (cf. sections 2.1. et 2.2.).

2.1. EXPERIENCE 2a : La rotation mentale tactile et visuelle dépend elle d'une expérience sensorielle spécifique ?

Dans cette deuxième expérience, les participants ont effectué deux tâches consécutives de rotation mentale (Shepard & Metzler, 1971) dans deux conditions sensorielles similaires (condition intramodale V-V ou T-T) ou différentes (conditions intermodale V-T ou T-V). Ils avaient pour tâche de juger de la similitude ou non de deux objets présentés visuellement ou explorés tactilement.

Généralement, plus les disparités angulaires augmentent pour des paires d'objets identiques, plus les erreurs sont fréquentes, et plus les temps de réponse sont longs, que la tâche soit visuelle (Cooper & Shepard, 1973 ; Shepard & Metzler, 1971) ou tactile (Prather & Sathian, 2002). Ces données comportementales, suggérant l'implication de processus de rotation mentale visuels et tactiles, ont été confirmées par des études neurophysiologiques (Röder et al., 1997 ; Rösler et al., 1993 ; cf. Cadre Théorique, section 1.7.). Toutefois, aucune étude n'a à ce jour évalué les transferts intermodaux dans une tâche de rotation mentale (sauf cf. Expérience 1). De plus, outre l'analyse des scores de précision et des temps de réponse, l'intérêt de cette tâche réside dans la possibilité d'analyser séparément les valeurs relatives à la pente (i.e., processus liés à la manipulation mentale de l'information ou à la rotation mentale) et à l'intercept (i.e., processus liés à l'encodage, la prise de décision et l'émission de la réponse).

Les résultats de notre étude auront différentes implications théoriques. Les fonctions linéaires obtenues devraient montrer une augmentation des temps de réponse (et erreurs) avec l'augmentation des disparités angulaires pour les deux modalités sensorielles. Ces résultats suggèrent la possibilité d'utiliser une image visuelle (Shepard & Metzler, 1971) ou spatiale (Rösler et al., 1993) pour effectuer une rotation mentale. Par contre, comme dans notre première expérience, une différence significative entre transferts intramodaux et transferts intermodaux nous permettra de suggérer une spécificité de traitement pour la rotation mentale visuelle et la rotation mentale tactile. Une asymétrie des transferts intermodaux pourra suggérer l'influence positive d'une expérience préalable visuelle, le toucher pouvant bénéficier d'une représentation visuelle en mémoire. En revanche, nous n'attendons pas d'avantage particulier d'une expérience tactile pour le traitement visuel des stimuli.

Dans un premier temps, les analyses des transferts seront menées sur les pourcentages de réponses correctes (i.e., reflétant la qualité des représentations) et les temps de réponses (i.e., reflétant le temps imparti aux processus de traitement de

l'information). Ensuite, concernant la valeur intercept, l'asymétrie des transferts intermodaux et intramodaux démontrera ou non une certaine spécificité (visuelle et tactile) des processus de traitement liés à l'encodage et à la programmation des réponses. Nous savons qu'une difficulté de représentation des objets et la complexité perçue des objets occasionne des temps d'encodage longs (Bethell-Fox & Shepard, 1988). L'intercept varie par exemple en fonction de la dimension des objets (Bauer & Jolicoeur, 1996 ; Shepard & Metzler, 1988). L'intercept serait plus élevé en rotation mentale tactile en raison du traitement séquentiel nécessitant plus de temps d'encodage (Dellantonio & Spagnolo, 1990 ; Hatwell, 2000a ; Lederman & Klatzky, 1997).

Une dernière analyse concerne la pente des fonctions linéaires. Une asymétrie des transferts intermodaux et intramodaux permettrait de conclure que les représentations visuelles sont différentes des représentations tactiles en rotation mentale, et concernant spécifiquement leur manipulation mentale. Nous nous attendons à observer un patron de résultats similaire aux résultats observés dans la première expérience de cette thèse : l'utilité d'une expérience visuelle en contexte de traitement tactile et l'impossibilité lors du traitement visuel de réutiliser les représentations découlant d'une expérience préalable tactile. Les représentations tactiles et visuelles, ainsi que leur manipulation, seraient alors spécifiques à la modalité sensorielle utilisée lors de la première session.

2.1.1 Méthode :

Cinquante-et-un étudiants droitiers (24 femmes et 27 hommes ; âge moyen 21.5 ± 4.5 ans) ont participé volontairement à cette expérience. Tous ont rapporté une vision normale ou normale-correctée, et aucune perte sensorielle tactile. Chaque participant a signé un formulaire de consentement avant de débiter l'étude.

a) Tâche et dispositif expérimental

Une tâche composée de 56 paires d'objets a été utilisée. Chaque paire d'objets présentait un modèle à gauche et un objet de comparaison à droite (par tâche : 28 paires d'objets identiques, et 28 paires d'objets miroirs). Les participants devaient décider le plus rapidement possible, suite à une exploration visuelle ou tactile, si les objets présentés étaient identiques ou différents. Chaque participant effectuait deux sessions consécutives de 56 paires d'objets.

Les mêmes stimuli ont été utilisés dans la tâche visuelle et dans la tâche tactile. Des objets similaires à ceux de Shepard et Metzler (1971) ont été construits. Chacun était constitué d'un assemblage de 10 cubes de bois collés face contre face de manière à former une figure structurée par quatre segments et constituée d'exactly trois angles droits, formant un objet en trois dimensions. Quatre modèles différents ont été créés pour minimiser l'effet de la pratique (Figure 24). Les objets ont été fixés sur des tiges métalliques (longueur ~ 3.5 cm ; diamètre = 0.3 cm) et centrés sur des planches (en tout 8 planches : 40 cm x 20 cm), à 15 centimètres d'écart (voir Figure 25, p. 93). Sur chacune des planches, les objets de comparaison pouvaient prendre sept positions par rapport au modèle en faisant varier leur disparité angulaire par rapport au modèle (0° ; 30° ; 60° ; 90° ; 120° ; 150° ; 180°). Les objets de comparaison se présentaient soit à l'identique du modèle (modulo la rotation angulaire), soit en miroir. Ainsi, 56 paires de figures ont été utilisées par session, que la tâche soit visuelle ou tactile : 4 modèles x 2 présentations (identiques ou miroir) x 7 disparités angulaires.

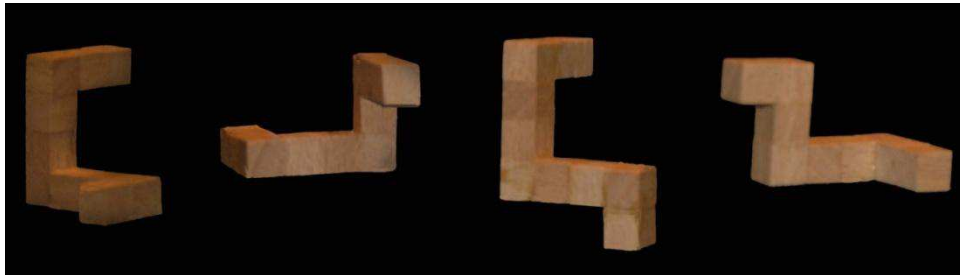


Figure 24. Modèles utilisés pour la construction de paires identiques et différentes (miroir).

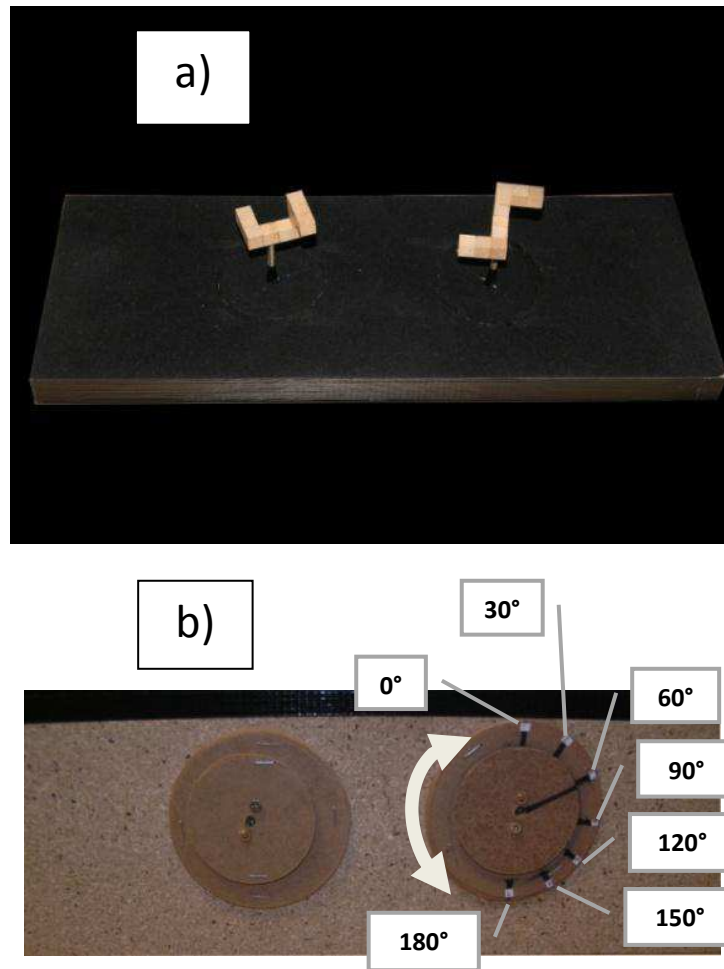


Figure 25. a) Illustration d'une planche identique (40 cm x 20 cm) avec modèle fixe à gauche et objet de comparaison à droite (15 cm d'écart). b) Vue de dessous d'une planche avec système de rotation de l'objet de comparaison sur sept positions angulaires possibles (0° ; 30° ; 60° ; 90° ; 120° ; 150° ; 180°).

Dans les conditions visuelle et tactile, les participants étaient assis sur une chaise ajustable devant le dispositif expérimental. Les planches étaient positionnées à un angle de 35° , à une distance de 60 cm par rapport aux yeux des participants. Elles étaient placées à 40 cm au dessus de la surface de la table de travail (à portée de la main droite des participants pour la condition tactile). L'exploration d'une paire d'objets devait commencer par une première inspection du modèle (à gauche). Pour la tâche visuelle comme pour la tâche tactile, les participants donnaient leurs réponses avec leur main gauche à l'aide d'un boîtier de réponse (2 touches : « figures identiques » / « figures différentes »). Une illustration du dispositif expérimental pour les deux conditions sensorielles est présentée à la Figure 26 (p. 95).

Dans la condition visuelle (V), les paires d'objets à chaque essai étaient positionnées initialement sur les rails derrière une porte mécanique gérée manuellement par l'expérimentateur. L'ouverture de cette porte (durée moyenne = 0.2 secondes) lançait le début de chaque présentation, rendant visible les objets. Le système Tobii® 120X (© TobiiTechnology AB, EMEA ; Duchowski, 2003) a été utilisé pour enregistrer et analyser les mouvements oculaires des participants, ainsi que les comportements de réponse (logiciel Clearview 2.7.0 ; ©TobiiTechnology AB, EMEA). La première fixation visuelle des participants à l'intérieur de la zone des objets, telle que définie dans le logiciel de correction Clearview, marquait le début de l'inspection des participants à chacune des présentations de paires. Les participants donnaient leurs réponses avec la main gauche en appuyant sur une souris d'ordinateur (bouton gauche = figures identiques ; bouton droit = figures différentes), ce qui permettait d'enregistrer avec précision les temps de réponses à l'aide d'un enregistrement intégré au logiciel Clearview.

Dans la condition tactile (T), les paires d'objets étaient placées derrière un écran opaque. Les participants plaçaient leur bras droit sur une table surélevée avec appui coude¹⁴, leur main droite passant derrière l'écran opaque, en position d'attente pour le traitement tactile. L'analyse débutait dès qu'une paire d'objets était en place, par une première inspection tactile du modèle avec la main droite et se terminait avec l'émission de la réponse. Les participants donnaient leurs réponses avec leur main gauche en appuyant sur le bouton d'un boîtier de réponse (bouton gauche = figures identiques ; bouton droit = figures différentes). Une caméra digitale positionnée au dessus du dispositif filmait la main droite des participants, sur les objets. Les boutons de réponses activaient une lumière correspondant à la réponse donnée, filmée pour définir les temps précis des réponses par l'étude des séquences vidéo. Les participants remettaient leur main droite en position d'attente avant la présentation des paires d'objets subséquentes.

¹⁴ Cette table surélevée et l'écran opaque étaient amovibles permettant d'adapter le dispositif à la condition sensorielle évaluée, visuelle ou tactile. De même, la porte mécanique dans la condition visuelle était retirée durant la condition tactile.

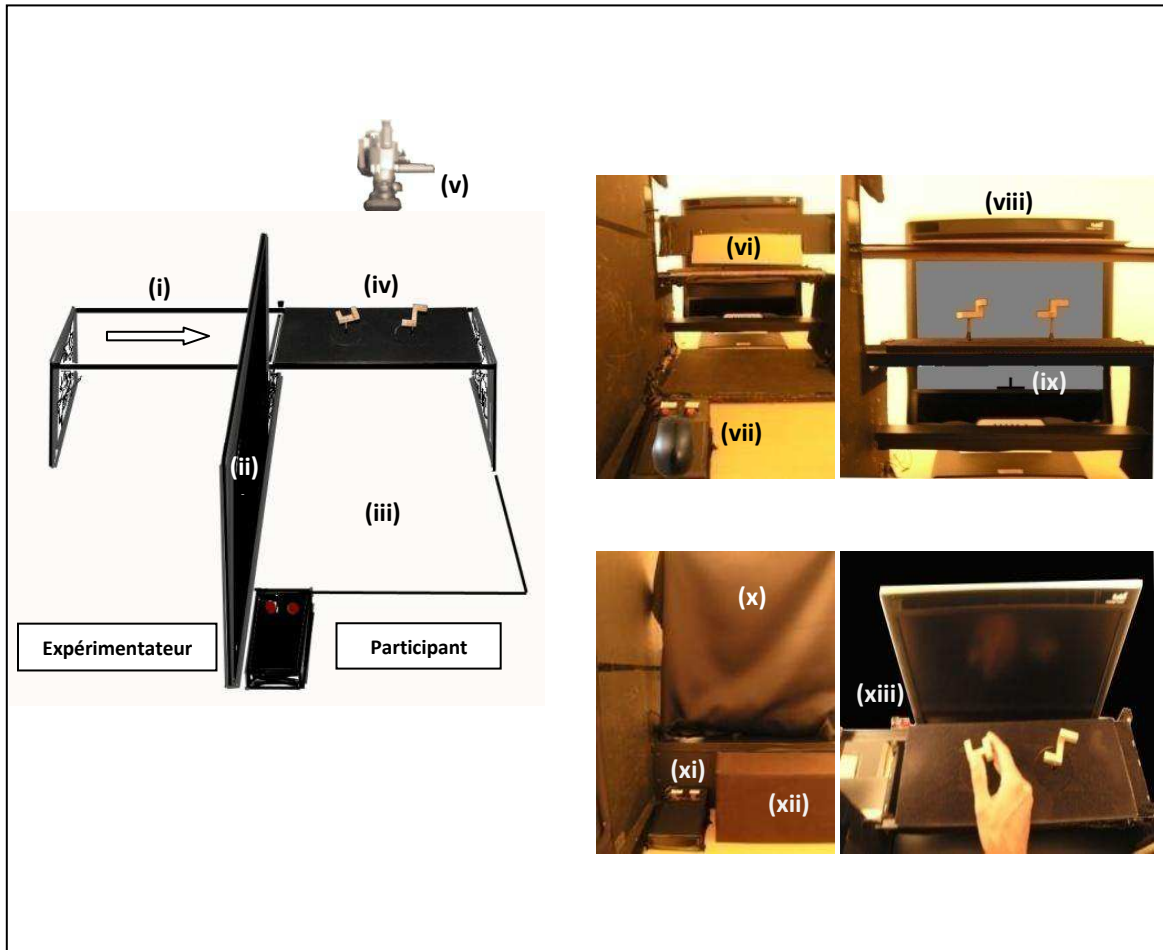


Figure 26. Illustration du dispositif expérimental et de l'espace de travail pour les deux conditions sensorielles. (i) Système de rails pour la préparation et le glissement des paires d'objets en position d'administration. (ii) Ecran entre l'expérimentateur et le participant. (iii) Espace de travail. (iv) Position des paires durant la tâche tactile et la tâche visuelle. (v) Caméra vidéo pour filmer la main droite sur les objets. (vi) Porte mécanique d'entrée visuelle aux paires d'objets. (vii) Boîtier de réponse avec souris pour la tâche visuelle. (viii) Ecran ©Tobii 120X pour la mesure des mouvements oculaires. (ix) Croix de fixation visuelle, inter-item. (x) Ecran d'occlusion visuelle durant la tâche tactile (les participants passaient leur bras droit dans une case d'entrée aux paires d'objets en bas d'écran d'occlusion). (xi) Boîtier de réponse, avec touches de lumière pour la tâche tactile. (xii) Appuie coude. (xiii) Lumières signalant une réponse et le changement de paires d'objets durant la tâche tactile.

b) Groupes expérimentaux et procédure :

Les participants ont été divisés en quatre groupes (Tableau 9). Ils ont effectué deux tâches successives de comparaison d'objets (session 1 et session 2) dans la même condition (condition intramodale : groupes T-T et V-V) ou dans des conditions différentes (condition intermodale : groupes V-T et T-V). En tout, cent-douze paires d'objets ont été administrées par participant. Les 56 paires de la première session étaient répétées à la deuxième session, et administrées de façon aléatoire à l'intérieur de chacune des sessions¹⁵.

Tableau 9. Récapitulatif des groupes expérimentaux (n= 51 ; Exp. 2a)¹⁶.

GROUPES	n (femmes ; hommes)	SESSION 1	SESSION 2
T-T	6 ; 7	56 paires tactiles	56 paires tactiles
V-V	6 ; 7	56 paires visuelles	56 paires visuelles
V-T	6 ; 6	56 paires visuelles	56 paires tactiles
T-V	6 ; 7	56 paires visuelles	56 paires tactiles

Avant de débiter les tâches visuelle et tactile, les participants recevaient les mêmes consignes verbales. Ensuite, quatre paires d'entraînement étaient utilisées pour familiariser les participants aux exigences de chacune des tâches (i.e., équipements particuliers, mode d'émission des réponses, etc.). Durant l'entraînement, l'expérimentateur corrigeait les erreurs des participants en s'assurant de la bonne compréhension des consignes de tâche. Durant la tâche expérimentale, aucun feedback (connaissance des résultats) n'était donné sur les réponses émises. Entre les sessions, une pause de cinq minutes était allouée aux participants permettant à l'expérimentateur de préparer l'équipement pour la session suivante, le cas échéant. La participation durait environ une heure.

Mesure des mouvements oculaires, enregistrement des réponses et définition du temps de réponse.

Une préparation spéciale a été requise pour intégrer la mesure des mouvements oculaires dans la condition visuelle, pour la mesure de l'inspection d'objets réels. Le système de mesure ©Tobii 120X consiste en un écran de 43 centimètres relié à un ordinateur (logiciel Clearview 2.7.0). Dans cette expérience, l'écran était placé derrière les rails de présentation des paires d'objets et la porte mécanique, de façon à ne pas engendrer

¹⁵ Le même modèle n'était jamais administré plus de trois fois à la suite. Les items de même nature de réponse, identique ou différente, n'étaient jamais administrés plus de trois fois à la suite.

¹⁶ Participants effectivement retenus dans l'analyse, selon critères, voir p. 98-99, c) Analyses des données.

d'interférence pour le fonctionnement des caméras du système et des capteurs infrarouges de position des pupilles (ce qui justifie la hauteur des rails par rapport à la table de travail à 40 centimètres, coupant l'écran à ses $\frac{3}{4}$ depuis le haut). Les objets étaient centrés à la verticale et à l'horizontal de l'écran.

Quelques spécifications peuvent être apportées quant aux moyens permettant d'assurer une mesure optimale des mouvements oculaires dans ce contexte. Une lumière adéquate sur les objets était nécessaire pour éviter des pertes de calibrage momentanées¹⁷. Aussi, le logiciel Clearview 2.7.0. projetait des fonds d'écran constants en gris (R:V:B = 128:128:128), permettant d'éliminer les effets perturbants d'une surbrillance d'écran et de persistance d'image suite à l'inspection des objets, avec un contraste forme/fond contrôlé¹⁸.

Le ©Tobii 120X ne nécessite pas de dispositif à adapter sur les participants. Ici, l'utilisation d'une mentonnière a tout de même permis d'éviter des dépassements de seuils inutiles des mouvements de tête (44 cm de largeur X 22 cm de hauteur, les yeux à 60-70 centimètres de l'écran) pour une mesure à 60 Hz avec précision de 0.5° constante. Avant de débiter la tâche, un exercice de calibrage à neuf points d'écran était effectué (avec fond d'écran R:V:B = 128:128:128). Entre les paires d'objets, les participants devaient fixer visuellement une croix à la limite inférieure de l'écran permettant de standardiser les pauses inter-item, et de maintenir une calibration adéquate durant la tâche.

La mesure des mouvements oculaires se faisait en continue, durant le déroulement de la tâche. Par contre, l'expérimentateur changeait d'écran de fond à chaque nouvelle paire d'objets et pour chaque pause inter-item en appuyant sur la barre d'espace de l'ordinateur secondaire, simultanément avec l'ouverture de la porte mécanique (début de la présentation d'une paire), et suite à la réponse des participants (fin d'une paire). Ceci permettait d'associer les fixations oculaires soit à la calibration inter-item, soit aux présentations de paires. Seules les fixations oculaires sur les objets ont été analysées.

Le logiciel Clearview 2.7.0. enregistrait les réponses des participants, donnant le temps précis des réponses ainsi que la nature exacte des réponses (bouton de réponse « identique » ou bouton de réponse « différent »). Ceci permettait de calculer le pourcentage de réponses correctes par participant. Les temps de réponse par paires d'objets

¹⁷ Des tests spécifiques d'éclairage d'objets ont permis de déterminer les meilleures conditions de présentation/projection d'objets-forme, avec contrôle d'ombrage, pour des mesures adéquates.

¹⁸ Par exemple, des écrans en fond noir augmentaient le contraste forme/fond, occasionnant des effets plus prolongés de persistance visuelle (*visual after-image*).

ont été calculés en secondes. Le temps de réponse, pour un essai, se définit comme le temps s'écoulant entre la première fixation oculaire enregistrée par l'oculomètre dans la zone des objets et l'émission de la réponse au moyen du boîtier de réponse.

Mesure de *l'exploration tactile, enregistrement des réponses* et définition du temps de réponse.

Les performances des participants dans la condition tactile ont été filmées à l'aide d'une caméra digitale. Le programme Actogram Kronos™ (version 1.1., ©Octares editions, Toulouse, France) a permis de traiter les séquences vidéos se rapportant aux temps d'inspection tactile. En plus de la main sur les objets, la zone filmée incluait les lumières activées par les comportements de réponse des participants (bouton/lumière « identique » ou bouton/lumière « différent »). Ceci permettait de calculer les pourcentages de réponses correctes des participants. Les temps de réponse par paires d'objets ont été calculés en secondes. Ils correspondent à la durée entre le début de l'inspection (lorsque la main touche pour la première fois le modèle) et l'émission de la réponse.

c) Analyse des données :

Pour les pourcentages de réponses correctes et les temps de réponses, des ANOVAs ont été menées séparément par session sur les paires d'objets identiques seulement¹⁹. Les analyses pour la session 1 permettaient de comparer les résultats aux tâches visuelle et tactile, sans expérience préalable, dans l'ensemble des groupes. Les analyses pour la session 2 évaluaient l'effet de l'expérience sensorielle précédente (i.e., condition intermodale vs. condition intramodale). Pour les deux sessions, les variables dépendantes ont été soumises à des ANOVAs à 2 Modalités x 2 Conditions x 7 Disparités angulaires.

Des ANOVAs à 2 Modalités x 2 Conditions x 7 Disparités angulaires ont été menées sur les taux de changement (TC). Les TC, exprimés en %, ont été calculés par disparité angulaire, selon la formule présentée dans l'Expérience 1a : [(niveau de base – session 2)/ niveau de base], pour une modalité sensorielle spécifique. Un TC négatif pour les pourcentages de réponses correctes témoigne d'une amélioration de la performance de la session 1 à la session 2, alors qu'un TC positif pour les temps de réponses traduit une diminution du temps nécessaire pour effectuer les comparaisons d'objets (amélioration de la performance).

¹⁹ La rotation mentale ne serait pas observée sur des paires d'objets miroirs (Cohen & Blair, 1998).

Des ANOVAs à 2 Modalités x 2 Conditions ont été menées sur les valeurs de pente et d'intercept, pour chaque session séparément. Des ANOVAs ont aussi été menées sur les taux de changement (TC), calculés pour la pente et l'intercept, selon les mêmes plans factoriels. Un TC positif correspond ici à une diminution de l'intercept, et une diminution de la pente.

Les résultats significatifs à $p < .05$ sont rapportés, ainsi que des analyses post-hoc le cas échéant (Tests de Newman-Keuls, avec corrections de Bonferonni). Des analyses par test-t examinent si les TC diffèrent significativement de zéro (avec corrections de Bonferonni). Sur le total de 56 participants recrutés, deux participants ont obtenu des pourcentages corrects inférieurs à 58% (chance). Trois participants ont donné des temps supérieurs à 2.5 écart-types au dessus de la moyenne, sur au moins 24 paires d'objets. De ce fait, ces cinq participants ont été retirés des analyses ($n=51$). Sur les paires d'objets analysables (2856 paires), 20 ont été jugés inutilisables (erreurs d'administration, items annulés : 0.7%). Cent-une données temporelles extrêmes ont été enlevées des analyses (3.5%), selon un seuil critère de 2.5 écart-types (analyse intra-participant).

2.1.2. Résultats :

a) Analyse des pourcentages de réponses correctes

Pour la session 1, l'analyse montre un effet principal de la Modalité, $F(1,47)=5.6$, $\eta_p^2=0.11$, et des Disparités angulaires, $F(6,282)=12.45$, $\eta_p^2=0.21$, ainsi qu'une interaction entre ces facteurs, $F(6,282)=3.03$, $\eta_p^2=0.06$, $p < .05$ (Figure 27, p. 100). En général, les participants en tâche tactile ont un pourcentage de réponses correctes supérieur (91%, ± 14.9) à ceux des participants en tâche visuelle (84.5, ± 23). Par contre, cette différence apparaît seulement aux angulations les plus fortes (150° et 180°). Comme on peut le voir sur la Figure 27, le pourcentage de réussite diminue moins fortement lorsque l'angulation des figures augmente dans la tâche tactile (180° > 30° ; $p < .0125$) que dans la tâche visuelle (de 0° à 120° < 150° et 180°, $p < .0125$).

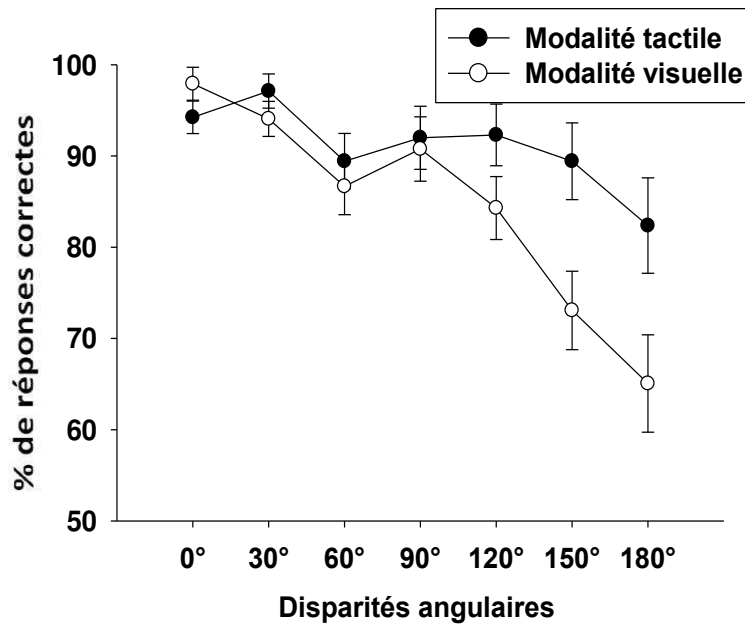


Figure 27. Pourcentages de réponses correctes (avec erreurs types) par modalité de tâche, par disparités angulaires, à la session 1.

Pour la session 2, l'analyse révèle une interaction significative entre les facteurs Condition et Modalité, $F(1,47)=8.9$, $\eta_p^2=0.16$, ainsi qu'un effet principal des Disparités angulaires, $F(6,282)=9.69$, $\eta_p^2=0.17$, $ps<.05$. L'interaction Condition x Modalité s'explique par une différence tendancielle des pourcentages de réponses correctes en modalité tactile, entre les conditions intra – et intermodales ($p=0.038$). On peut observer qu'une expérience préalable visuelle ne conduit pas à de meilleures performances tactiles (Figure 28). Quelles que soient la modalité et la condition, le pourcentage de réponses correctes diminue avec l'augmentation des disparités angulaires ($0^\circ-120^\circ > 150^\circ > 180^\circ$, $ps<.0125$).

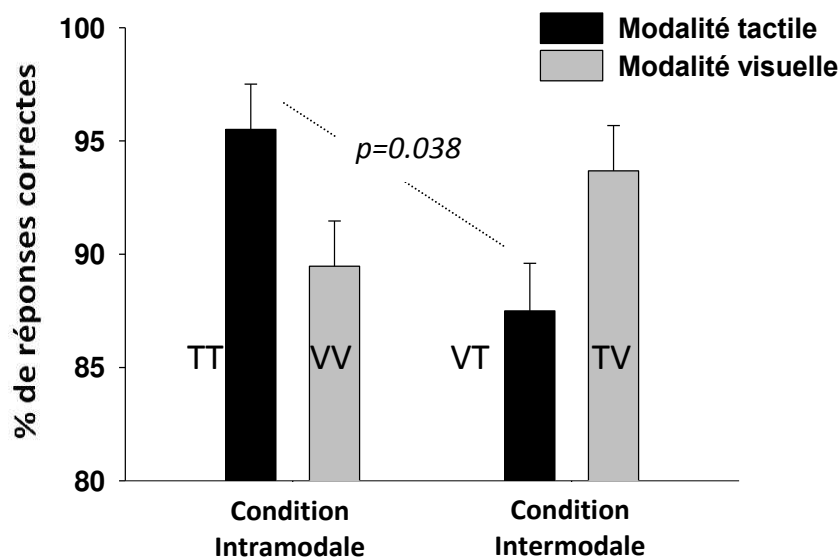
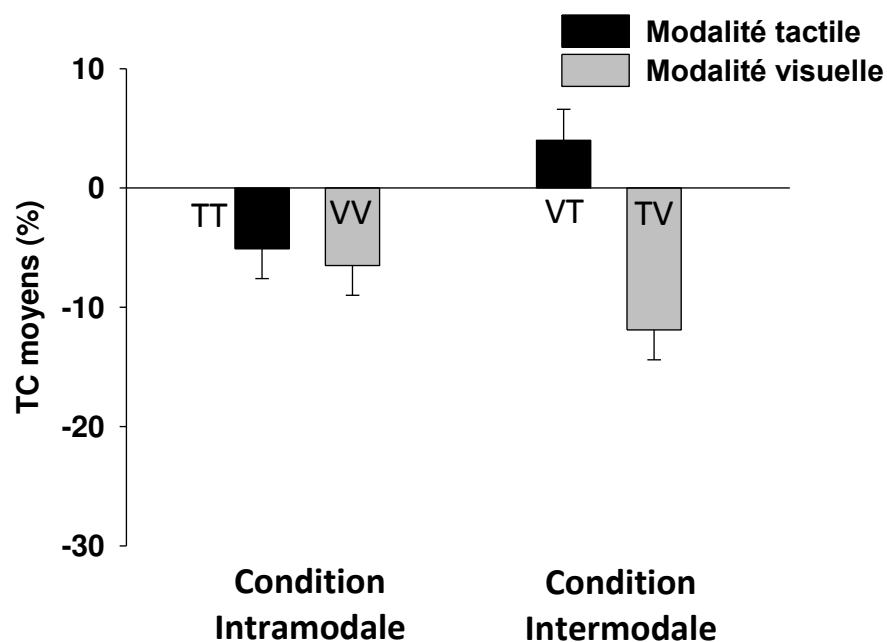


Figure 28. Pourcentage de réponses correctes (avec erreurs types) par condition de changement, par modalité de tâche, à la session 2.

L'analyse sur les TC indique un effet principal de la Modalité, $F(1,47)=11.12$, $\eta_p^2=0.19$, une interaction entre la Condition et la Modalité, $F(1,47)=7.9$, $\eta_p^2=0.14$ (Figure 29a), ainsi qu'une interaction entre les Disparités angulaires et la Modalité, $F(6,282)=2.3$, $\eta_p^2=0.046$, $p<.05$ (Figure 29b, p. 102). L'interaction Condition x Modalité s'explique par le fait que l'utilisation de la modalité tactile en condition intermodale ($V-T=+4$) s'accompagne d'un TC positif (mais non significativement différent de zéro, $t(11)=-1.28$, $p>.0125$), alors que les autres groupes présentent un TC négatif significativement différent de zéro ($T-T=-5\%$ et $T-V=-12\%$: $t_s>-2.86$, $p_s<.0125$) ou tendant à l'amélioration ($V-V=-6.4\%$, $t(12)=-2.14$, $p=.05$). L'interaction Disparités angulaires x Modalité résulte d'une différence des TC de précision entre les participants en modalité tactile et les participants en modalité visuelle pour les disparités angulaires les plus fortes (150° et 180° , $p_s<.0125$). Pour les participants en modalité visuelle seulement, les TC obtenus aux disparités 150° - 180° diffèrent significativement des TC obtenus aux disparités 0° - 30° ($p_s<.0125$).

a)



b)

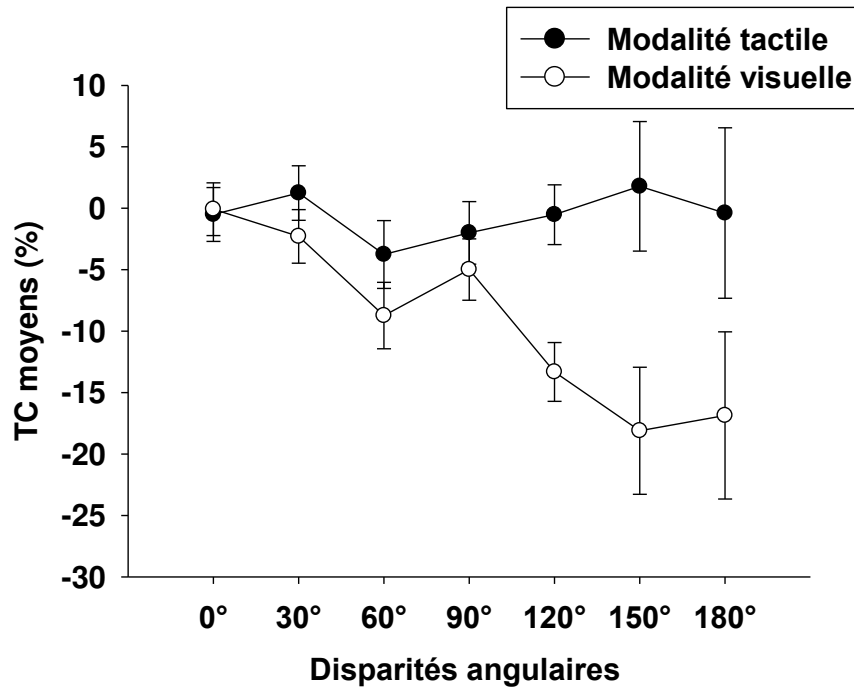


Figure 29. a) Taux de changement des pourcentages de réponses (avec erreurs types) par modalité, par condition ; b) Taux de changement des pourcentages de réponses correctes (avec erreurs types), par modalité et par disparités angulaires. Rappel : un TC négatif traduit une amélioration de la précision de la session 1 à la session 2.

b) Analyse des temps de réponse

Pour la session 1, l'analyse indique un effet principal de la Modalité, $F(1,45)=59.93$, $\eta_p^2=0.57$, et des Disparités angulaires, $F(6,270)=8.25$, $\eta_p^2=0.15$, ainsi qu'une interaction significative entre ces facteurs, $F(6,270)=2.9$, $\eta_p^2=0.06$, $ps<.05$. Les participants en modalité tactile prennent en moyenne 5 fois plus de temps que les participants en modalité visuelle quelles que soient les disparités angulaires (Figure 30, p. 103). L'interaction Modalité x Disparités angulaires résulte d'un effet significatif des disparités angulaires pour la modalité tactile uniquement ($0^\circ = 30^\circ < 90^\circ$; $0^\circ = 30^\circ = 60^\circ < 120^\circ = 150^\circ = 180^\circ$, $ps<.0125$).

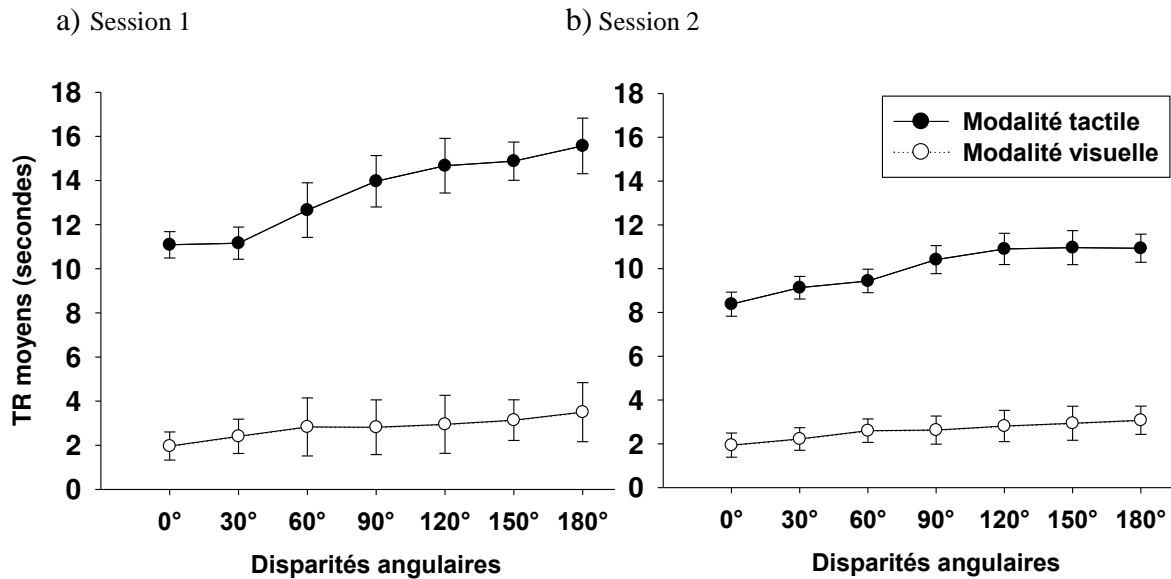


Figure 30. Temps de réponses (avec erreurs types) par modalité et par disparités angulaires : a) à la session 1 et b) à la session 2.

Pour la session 2, l'analyse indique un effet principal de la Modalité, $F(1,46)=86.57$, $\eta_p^2=0.65$, et des Disparités angulaires, $F(6,276)=9.47$, $\eta_p^2=0.17$, $ps<.05$, ainsi qu'une interaction significative entre ces deux facteurs, $F(6,276)=2.1$, $\eta_p^2=0.043$, $p<.05$. Les temps sont généralement plus longs dans la tâche tactile que dans la tâche visuelle. Les analyses post-hoc nous permettent de confirmer l'augmentation des temps de réponse avec l'augmentation de la disparité angulaire, cette augmentation étant toutefois plus forte dans la tâche tactile ($0^\circ < 60^\circ$ - 180° , $30^\circ < 90^\circ$ - 180° , $60^\circ < 120^\circ$ - 180° , $ps<.0125$) (Figure 30b). Dans les deux modalités sensorielles les participants augmentent leurs temps de réponse avec l'augmentation des disparités angulaires.

L'analyse sur les TC indique seulement un effet principal de la Modalité, $F(1,47)=5.4$, $p<.05$, $\eta_p^2=0.10$, et un effet tendanciel de la Condition, $F(1,47)=3.4$, $p=.07$, $\eta_p^2=0.067$ (Figure 31, p. 104), les TC tendant à être plus forts en condition intramodale qu'en condition intermodale. L'effet de la modalité résulte de TC plus faibles lorsque la tâche est réalisée avec la modalité visuelle (6.7%) qu'avec la modalité tactile (25%). Tous les groupes, sauf le groupe T-V, présentent des TC négatifs significativement différents de zéro (T-T : $t(12)=3.53$, $p<.0125$) ou tendant à une différence significative (V-V et V-T : $ts>2.53$, $ps<.026$), attestant de la diminution des temps de réponse en session 2. Les résultats du groupe T-V suggèrent l'inutilité d'une expérience préalable tactile sur les performances de la tâche visuelle.

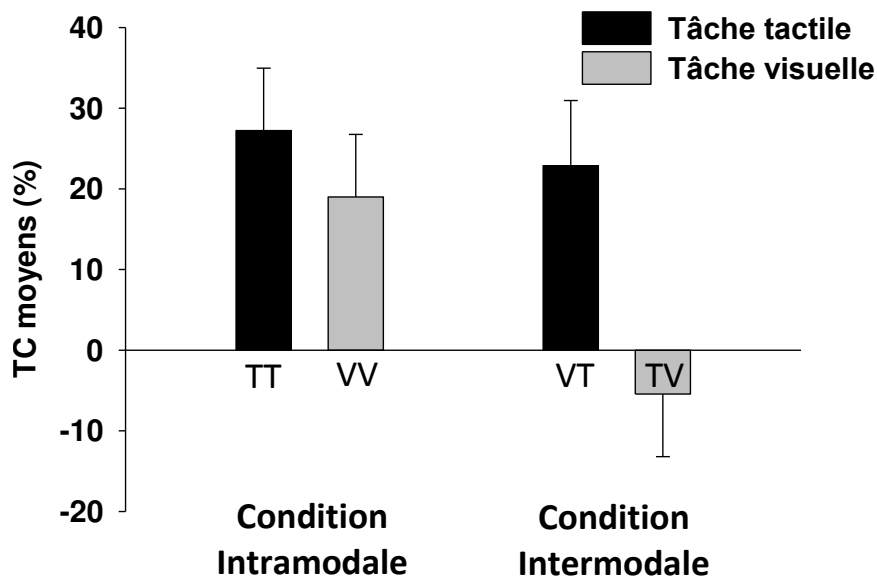


Figure 31. Taux de changement (en %, avec erreurs types) des temps de réponse par condition et par modalité. Rappel : un TC positif traduit une amélioration de la performance, c'est-à-dire une diminution des temps de réponse de la session 1 à la session 2.

c) Analyses de l'intercept et de la pente

Pour les intercepts de la session 1, l'analyse indique seulement un effet principal de la Modalité, $F(1,47)=60.9$, $p<.05$, $\eta_p^2=0.56$. Un résultat similaire est obtenu en session 2 (Modalité, $F(1,47)=82.5$, $p<.05$, $\eta_p^2=0.64$). Aux deux sessions, la valeur des intercepts est supérieure pour la modalité tactile que pour la modalité visuelle (Figures 32a et 32b, p. 105). L'analyse des TC sur l'intercept indique un effet de la Modalité, $F(1,47)=4$, $p<.05$, $\eta_p^2=0.08$, sans effet de la Condition ni d'interaction entre ces facteurs ($F<1.8$). L'amélioration de la valeur de l'intercept lors de la deuxième session est plus importante en tâche tactile qu'en tâche visuelle. Des analyses par test-t de Student, après corrections de Bonferonni, montrent des valeurs tendant à être significativement différentes de zéro pour les groupes T-T (+22.7% ; $t(12)=2.39$, $p=.03$), V-T (+19.6% ; $t(11)=2.13$, $p=.05$) et V-V (+14% ; $t(12)=1.95$, $p=.07$). Aucune amélioration significative n'apparaît dans le groupe T-V (-7.2%) ($t(12)=-0.74$, $p=.47$) (Figure 33a, p. 106).

L'analyse des pentes de la session 1 met en évidence un effet principal de la Modalité, $F(1,47)=14.4$, $p<.05$, $\eta_p^2=0.23$ (Figure 32a). Les valeurs de pentes sont plus élevées pour les participants réalisant la tâche avec la modalité tactile (moyenne = 820 ms/30°) qu'avec la modalité visuelle (moyenne = 214 ms/30°). L'analyse des pentes de la deuxième session met également en évidence un effet principal de la Modalité,

$F(1,47)=7.1$, $p<.05$, $\eta_p^2=0.13$ (Figure 32b). De nouveau, on retrouve des valeurs de pentes plus élevées pour la tâche tactile (457 ms/30°) que pour la tâche visuelle (176 ms/30°). L'analyse des TC sur la pente n'indique aucun effet de la Condition ($F_s<2$). Cependant, l'analyse par test-t de Student montre des TC de pentes significativement différents de zéro pour le groupe en condition intramodale T-T (+49%, $t(12)=3.4$, $p<.0125$), ainsi qu'une tendance de différences pour les participants du groupe V-V (+34.5%, $t(12)=2.19$, $p=.04$). Les valeurs TC des groupes V-T (+39% ; $t(12)=1.8$, $p=.08$) et T-V (+0.9% ; $t(11)=.05$, $p=.96$) ne diffèrent pas significativement de zéro, bien qu'on observe une « diminution tendancielle » de la pente lorsqu'une expérience visuelle précède la tâche tactile (Figure 33b, p. 106).

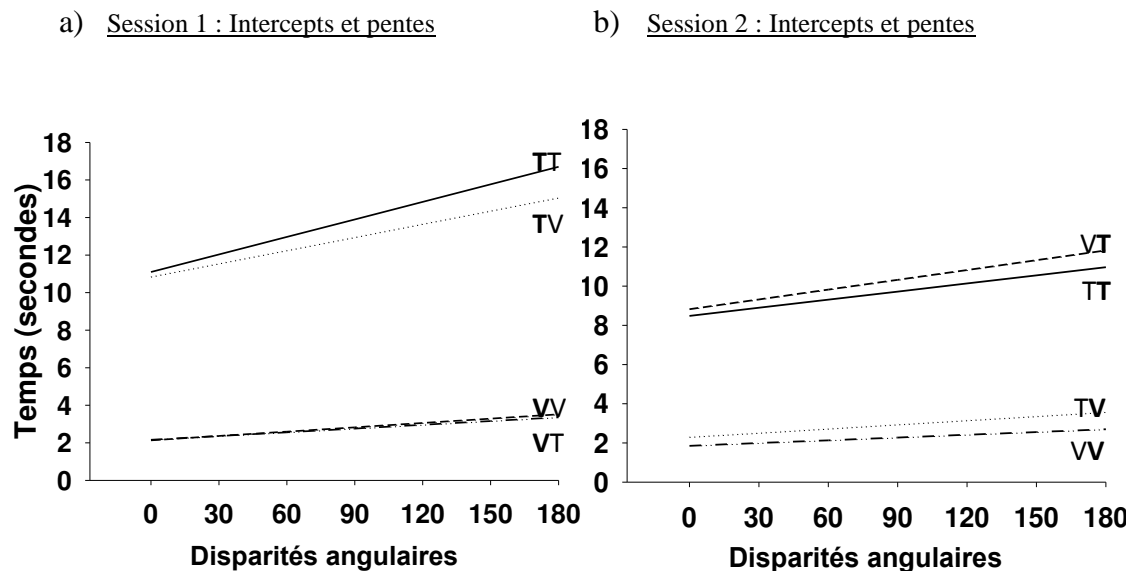


Figure 32. a) Intercepts et pentes exprimés par droites linéaires, par modalité de tâche, par condition de changement, par disparités angulaires, à la session 1 et à la b) session 2.

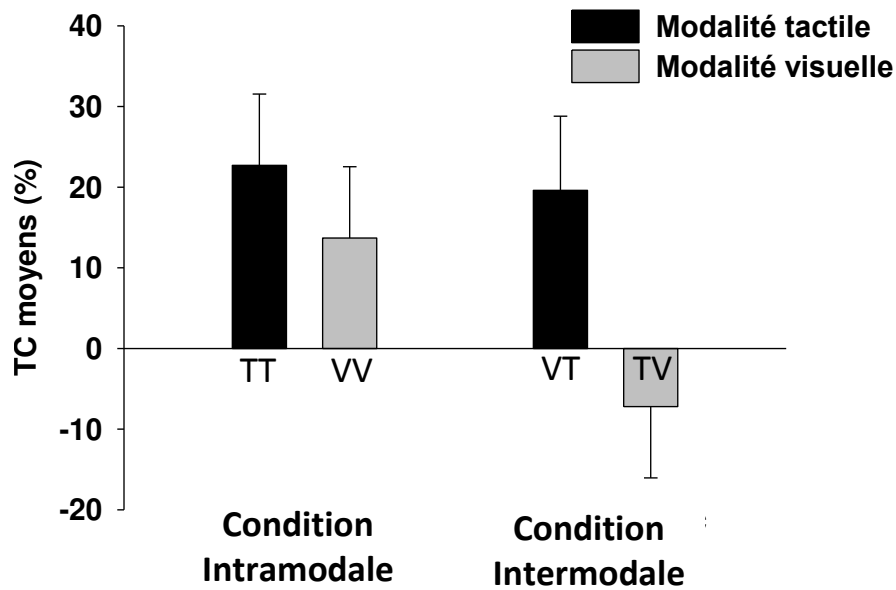
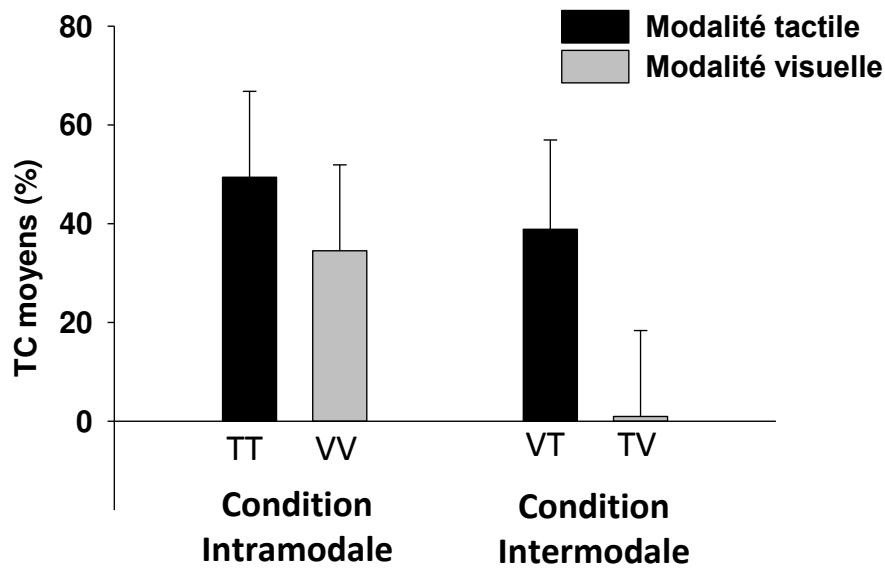
a) TC interceptsb) TC pentes

Figure 33. a) Taux de changement sur les intercepts (avec erreurs types) par modalité de tâche, par condition de changement ; b) Taux de changement sur les pentes (avec erreurs types) par modalité de tâche, par condition de changement. Rappel : un TC positif traduit une diminution des temps d'encodage et de programmation des réponses (intercepts) et de la vitesse de rotation mentale (pente).

d) Analyse des compromis vitesse-précision

Une analyse corrélationnelle entre les temps et les pourcentages de réponses correctes, pour chacune des angulations, ne démontre pas de compromis vitesse-précision. Pour la session 2, les participants plus rapides du groupe V-T obtiennent proportionnellement plus de réponses correctes tactiles ($r=-.69$, $p<.05$). Cette relation est située spécifiquement sur les paires d'objets avec disparités angulaires élevées à 150° ($r=-.61$, $p<.05$) et à 180° ($r=-.83$, $p<.05$), ainsi qu'une disparité moindre à 60° ($r=-.79$, $p<.05$). Néanmoins, il faut noter que ces analyses corrélationnelles ont été conduites sur très peu de participants par groupes ($n \leq 13$). Des tests de normalité de Kolmogorov-Smirnov montrent une distribution normale sur les temps de réponse, pour le groupe V-T, aux angulations 60° , 150° , et 180° ($d > .25$, $p > .20$, $\text{lilliefors} > .20$). Les analyses corrélationnelles indiquent alors que les participants plus lents dans le groupe V-T rencontrent plus de difficultés en rotation mentale tactile, et spécialement pour les angulations les plus élevées. Une corrélation élevée est aussi obtenue pour le groupe V-T entre la moyenne des TC précision et la moyenne des TC temps ($r=-.67$, $p<.05$). Dans ce groupe, les participants qui s'améliorent le plus de la session 1 à la session 2, du point de vue de la précision, diminuent aussi le plus leurs temps de réponses.

2.1.3. Discussion :

L'objectif de l'Expérience 2a était d'examiner les similarités/dissimilarités entre rotations mentales visuelles et tactiles, en utilisant une tâche élémentaire de rotation mentale (Shepard & Metzler, 1971). Les résultats obtenus démontrent une diminution de la fréquence des réponses correctes avec l'augmentation des disparités angulaires, dans les deux modalités sensorielles. En général, les temps de réponses augmentent avec l'augmentation des disparités angulaires. Ces résultats suggèrent l'utilisation de processus de rotation mentale dans les deux modalités sensorielles (Cohen & Blair, 1998 ; Dellantano & Spagnolo, 1990 ; Prather & Sathian, 2002 ; Shepard & Metzler, 1971). Or, les disparités angulaires élevées affectent davantage la précision visuelle (% de bonnes réponses 150° - 180° : $T > V$) et les temps de réponses tactiles, à la première session. Ces résultats démontrent différents effets de l'angulation lorsque l'on compare les deux modalités sensorielles, comme d'autres chercheurs l'ont rapporté (Newell et al., 2001 ; Woods & Newell, 2004), notamment en raison d'un « référentiel déictique » pouvant

différer entre les deux modalités sensorielles. Les références spatiales varient en fonction des modalités sensorielles d'encodage (Volcic et al., 2010 ; cf. Section 1.8.), pouvant ainsi causer des processus de haut niveau spécifiques. Par ailleurs, les valeurs de pentes plus élevées en modalité tactile confirment que la rotation mentale tactile nécessite plus de temps que la rotation mentale visuelle. La rotation mentale, par conséquent, n'est pas nécessairement de même nature dans les deux modalités sensorielles.

Notamment pour les variables de la précision, les temps de réponse et les intercepts, nous observons une équivalence partielle, ou une asymétrie des transferts intermodaux, ce qui démontre une spécificité du traitement visuel et tactile en rotation mentale. Contrairement à l'hypothèse d'un avantage visuel en aptitudes spatiales (Millar & Al-Attar, 2005), nos résultats ne démontrent pas d'effet bénéfique d'une expérience visuelle sur la précision obtenue à une tâche ultérieure sollicitant la modalité tactile. Néanmoins, l'expérience visuelle tend à favoriser une diminution des temps de réponse tactile et de l'intercept tactile. Quant-à-l'expérience tactile, elle permet seulement de réaliser moins d'erreurs lors d'une tâche visuelle. Ainsi, l'expérience tactile influence la construction des représentations visuelles, alors que l'influence d'une expérience visuelle est plus marquée dans les traitements « d'encodages » tactiles.

Par ailleurs, les participants des groupes intramodaux s'améliorent de façon similaire en ce qui concerne les variables de précision, de temps de réponse, d'intercept et de pente. On pouvait s'attendre à un tel résultat lorsque l'on considère les études qui rapportent des patrons d'amélioration des processus suite à la répétition d'essais en rotation mentale (Albers & Hoft, 2009 ; Heil et al., 1998) et en aptitudes spatiales (Goldstone, 1998 ; Richard et al., 2004).

En ce qui concerne l'évolution de la pente de la session 1 à la session 2, les résultats obtenus traduisent une diminution de son inclinaison en condition intramodale, ce qui correspond à une augmentation de la vitesse de rotation mentale et/ou une précision des mécanismes sous-tendant la rotation mentale, quelle que soit la modalité sollicitée. Ces résultats suggèrent par ailleurs une spécificité des processus de manipulation des représentations visuelles et tactiles en rotation mentale, puisqu'aucun transfert significatif n'est observé en condition intermodale. Néanmoins, pour le groupe V-T, un « transfert tendanciel » sur la variable de pente ($p=.08$) suggère que les processus de manipulation des représentations découlant de l'expérience visuelle seraient réutilisables en condition tactile, sans que nous puissions le confirmer suite à cette expérience. L'utilisation d'une rotation mentale imagée visuelle est alors spécifique de la modalité visuelle. La rotation mentale

lors d'une exploration tactile des objets dépend d'un autre format de représentation, spécifique quant à lui de la modalité tactile. Ces résultats concordent avec les données obtenues suite à l'étude de sujets aveugles (Carpenter & Eisenberg, 1978), d'anciens aveugles (Held et al., 2011), ainsi qu'avec les résultats d'études qui distinguent généralement deux processus de manipulation des images (visuelles vs. spatiales ; Farah et al., 1988 ; Kozevnikov et al., 2005). Ainsi, comme nous l'avons démontré dans l'Expérience 1, lors d'une première session, sans expérience préalable, la rotation mentale visuelle et tactile est spécifique à la modalité sensorielle utilisée.

En somme, nous n'obtenons pas d'équivalences entre conditions intermodales et intramodales pour une tâche de rotation mentale présentant des paires d'objets tridimensionnels. Si la vision et le toucher dépendaient d'un système commun de représentations, nous serions en mesure d'observer une équivalence entre conditions intramodales et intermodales pour le traitement des représentations en rotation mentale (i.e., Gibson, 1966 ; voir Lacey & Sathian, 2008, cf. section 1.7.). Découlant du paradigme de transferts intermodaux, l'asymétrie des transferts intermodaux démontre plutôt l'utilisation de processus spécifiques pour la rotation mentale dans les deux modalités sensorielles. Ainsi une représentation visuelle n'est pas nécessaire pour la rotation mentale tactile (session 1). Sur ce point, les résultats de cette expérience ne convergent ni avec les résultats d'études comportementales suggérant des processus de rotation mentale similaires visuels et tactiles (Dellantonio & Spagnalo, 1990 ; Kaas et al., 2008 ; Prather & Sathian, 2002), ni avec ceux d'études neurophysiologiques suggérant l'utilisation et la manipulation d'une représentation visuelle lors d'une rotation mentale tactile (Prather et al., 2004 ; Sathian et al., 1997 ; Sathian, 2005).

Dans l'Expérience 2a, nous avons montré des transferts visuels dans le traitement tactile pouvant suggérer une influence plus marquée pour des processus d'encodage, alors que l'influence tactile a seulement été observée pour la précision visuelle. En utilisant une approche différente, nous évaluerons dans l'Expérience 2b les influences intermodales sur les patrons de prise d'information. De même nous procéderons à l'étude des transferts intermodaux des processus cognitifs implicites décrivant différentes stratégies cognitives.

2.2. **EXPERIENCE 2b** : L'expérience tactile influence-t-elle la rotation mentale visuelle ? Etude des stratégies liées à la prise des informations spatiales.

L'enregistrement des mouvements oculaires et de l'exploration tactile lors d'une tâche spatiale permet d'analyser les stratégies visuelles (Bethell-Fox et al., 1984 ; Carpenter & Just, 1985 ; Hayehoe, 2004 ; Just & Carpenter, 1976 ; Pailhous, 1970 ; Vigneau, Caissie & Bors, 2006) et tactiles (Lederman & Klatzky, 1987 ; Richard et al., 2004) impliquées dans la résolution d'analogies spatiales. Ainsi, l'enregistrement de la prise d'informations spatiales constitue une mesure des fonctions cognitives chez des participants lors du traitement d'une tâche de rotation mentale (Alexander & Son, 2007). Selon la modalité sensorielle de traitement utilisée, les participants procèdent à une prise d'information différente, notamment en raison de références spatiales différentes (Volcic et al., 2009 ; 2010) et de processus d'encodage différents (Hatwell, 2000a ; Lederman & Klatzky, 1987). Dans cette expérience, notre objectif vise à comparer les stratégies visuelles et tactiles en rotation mentale (session 1). Nous évaluerons aussi l'effet d'une expérience préalable spécifique sur les stratégies mises en œuvre dans une tâche subséquente (conditions intermodale et intramodale ; session 2).

Notre description des variables stratégiques s'inspire de quelques travaux menés sur des tâches visuo-spatiales (Bethell-Fox et al., 1984 ; Carpenter & Just, 1985 ; Fitzhugh et al., 2008 ; Just & Carpenter, 1976 ; Vigneau et al., 2006). Lors d'une tâche élémentaire de rotation mentale, l'exploration visuelle ou tactile s'effectue sur chacun des objets (Expérience 2a). Nous définirons alors une première variable stratégique (1) par le calcul de la proportion du temps d'inspection du modèle. Une deuxième variable stratégique se définira (2) par le calcul du nombre de comparaisons effectuées entre le modèle et l'objet de comparaison. Une troisième variable stratégique se définira (3) par le calcul du nombre de fixations oculaires sur le haut des objets. En effet, les paires d'objets présentées peuvent nécessiter des inspections visuelles privilégiant l'ensemble ou une partie spécifique des objets (ex., haut/base). Cette variable stratégique (3) nous permet uniquement de comparer l'évolution des stratégies visuelles dans les conditions intra – et inter – modale. Les autres variables (1 et 2) permettent d'évaluer l'évolution des stratégies tactiles et visuelles, dans les conditions intra – et inter – modale.

En général, les patrons de prise d'information révéleront des stratégies différentes visuelles et tactiles, pouvant néanmoins évoluer de façon similaire, suite à une répétition de tâche en condition intramodale (Gibson, 1953 ; Goldstone, 1998 ; Pailhous, 1970 ; Richard et al., 2004). En condition intermodale, un taux de changement significatif, par rapport à la

première session, permettra de conclure que certains aspects stratégiques du traitement d'information sont transférés, ou réutilisés, malgré un changement des modalités sensorielles. Les participants réutiliseraient alors des composantes stratégiques découlant de l'expérience tactile dans leur analyse visuelle, et inversement.

2.2.1. Méthode :

Les mêmes méthodes que celles décrites dans l'Expérience 2a ont été utilisées (description des groupes : Tableau 10). Les données des mouvements oculaires et des films réalisés dans les tâches tactiles ont été traitées spécialement pour calculer chacune des variables censées retracer les stratégies d'exploration des objets.

Tableau 10. Récapitulatif des groupes expérimentaux (N = 51 ; Exp. 2b).

GROUPES	n (femmes ; hommes)	SESSION 1	SESSION 2
T-T	6 ; 7	56 paires tactiles	56 paires tactiles
V-V	6 ; 7	56 paires visuelles	56 paires visuelles
V-T	6 ; 6	56 paires visuelles	56 paires tactiles
T-V	6 ; 7	56 paires visuelles	56 paires tactiles

a) Description des variables

Les formules de calcul par variables stratégiques avec illustrations sont présentées aux Figures 34, 35, et 36 (p. 112). Seules les réponses correctes ont été retenues. Chaque variable a été moyennée par catégorie des disparités angulaires : 0° ; 30° ; 60° ; 90° ; 120° ; 150° ; 180°. La définition des temps de réponse (TR) correspond à la définition de l'Expérience 2a (voir pp. 98-99).

$$(1) \text{ PTM} = \text{Proportion des Temps d'inspection du Modèle} = \frac{\text{Temps sur modèle}}{\text{Temps de réponse}}$$

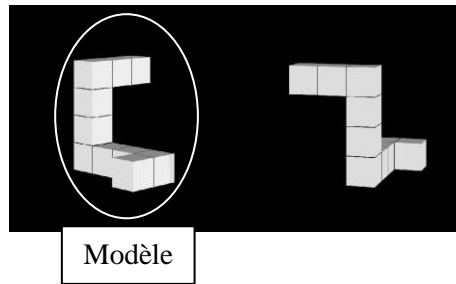


Figure 34. Calcul et illustration de la variable stratégique (1) PTM : proportions des temps d'inspection visuels et tactiles sur le modèle, par paires d'objets.

$$(2) \text{ NCs} = \text{Nombre de Comparaisons par seconde entre objets} = \frac{\text{Comparaisons}}{\text{Temps de réponse}}$$

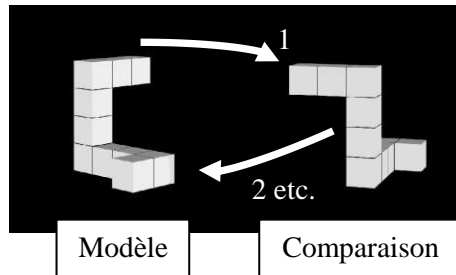


Figure 35. Calcul et illustration de la variable stratégique (2) NCs : nombre de comparaisons par seconde, visuelles et tactiles, entre modèles et objets de comparaison, par paires d'objets.

$$(3) \text{ NFHs} = \text{Nombre de Fixations oculaires sur le Haut des objets par seconde}$$

$$= \frac{\text{Fixations sur le haut}}{\text{Temps de réponse}}$$

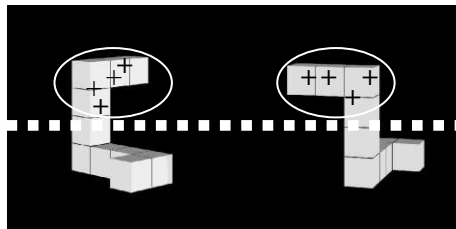


Figure 36. Calcul et illustration de la variable stratégique (3) NFHs : nombre total de fixations oculaires sur le haut des objets, par seconde, par paires d'objets.

Globalement, les variables qualifient le mode d'inspection pouvant être utilisé par les participants dans une modalité de tâche donnée. Ces variables permettent de décrire, d'une part, le ratio des temps d'inspection qu'accordent les participants à chacun des objets présentés (PTM) et d'autre part, les comportements de comparaisons entre objets (NC) et le nombre de fixations oculaires sur le haut des objets lors de la tâche (NFH). Les variables PTM, NC, et NFH ont été standardisées sur les temps de réponse. Les variables standardisées NCs et NFHs expriment les ratios des comportements observés par seconde, dans les deux modalités sensorielles.

b) Analyse des données

Les données de la session 1 ont été analysées séparément des données de la session 2. Les analyses pour la session 1 examinent les différences de stratégies des participants dans les modalités de la vue et du toucher, pour l'ensemble des groupes. Les analyses pour la session 2 évaluent l'effet de l'expérience sensorielle précédente (condition intra vs. condition inter – modale) sur les stratégies développées.

Pour les deux sessions et les taux de changement, les variables stratégiques PTM, et NCs ont été soumises à des ANOVAs à 2 Modalités x 2 Conditions x 7 Disparités angulaires avec mesures répétées sur le dernier facteur. La variable stratégique NFHs analysée aux deux sessions et pour les TC, a été soumise à des ANOVAs à 2 Conditions x 7 Disparités angulaires. Les TC pour toutes les variables ont été calculés par disparité angulaire, selon la formule présentée dans l'Expérience 2a : [(niveau de base – session 2)/niveau de base], pour une modalité sensorielle spécifique. Un TC négatif témoigne d'une augmentation de la fréquence des comportements associés aux stratégies, de la session 1 à la session 2, alors qu'un TC positif témoigne d'une diminution. Des analyses par test-t de Student examinent si les TC diffèrent significativement de zéro. Les résultats significatifs à $p < .05$ ont été rapportés, ainsi que des analyses post-hoc le cas échéant (Tests de Newman-Keuls, avec corrections de Bonferonni). Pour deux participants du groupe V-T, les patrons de mouvements oculaires en session 1 n'ont pu être analysés (session 1 : N=49), en raison de difficultés liées à la mesure des mouvements oculaires. Ces participants ont tout de même été conservés dans l'analyse tactile de la session 2 (N=51).

2.2.2. Résultats :

a) Analyse de la variable Proportion des Temps d'inspection du Modèle (PTM)

Pour la session 1, l'analyse montre un effet principal de la Modalité, $F(1,44)=41.5$, $p<.05$, $\eta_p^2=0.48$, un effet tendanciel des Disparités angulaires, $F(6,264)=3.35$, $p=.055$, $\eta_p^2=0.045$, ainsi qu'une interaction significative entre ces facteurs, $F(6,264)=3.35$, $p<.05$, $\eta_p^2=0.07$ (Figure 37). De façon générale, la proportion de temps d'inspection accordée au modèle est plus importante dans la tâche tactile (0.59) que dans la tâche visuelle (0.50). Cette différence apparaît pour chaque disparité angulaire ($ps<.05$). L'interaction s'explique toutefois par une proportion des temps d'inspection tactile plus élevée pour le modèle à 0° que pour les autres disparités angulaires ($ps<.0125$). Aucun effet de la disparité angulaire n'apparaît dans la tâche visuelle.

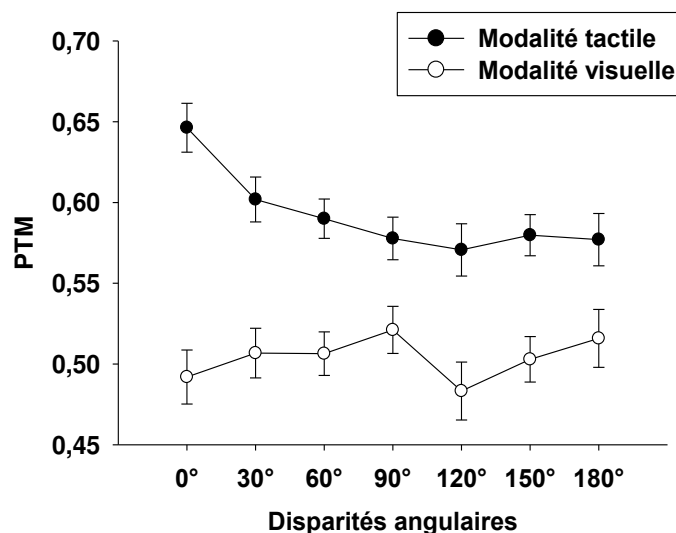


Figure 37. Proportion des temps d'inspection du modèle (PTM, avec erreurs types) à la session 1, par modalités et par disparités angulaires.

Pour la session 2, l'analyse montre un effet principal de la Modalité, $F(1,46)=10$, $\eta_p^2=0.18$, de la Condition, $F(1,46)=6.2$, $\eta_p^2=0.12$, des Disparités angulaires, $F(6,276)=6.6$, $\eta_p^2=0.13$, ainsi qu'une interaction entre les facteurs Disparités angulaires et Modalité, $F(6,276)=3.6$, $\eta_p^2=0.07$, $ps<.05$ (Figure 38, p. 115). Les participants passent plus de temps à inspecter le modèle en condition intermodale (0.56) qu'en condition intramodale (0.53) ainsi que dans la tâche tactile (0.57) comparée à la tâche visuelle (0.52). Cependant, cette différence entre les deux tâches est significative seulement pour les disparités angulaires les plus faibles (0° et 30° ; $ps<.0125$). De plus, dans la tâche tactile, les participants passent

plus de temps à inspecter le modèle dans le cas où la disparité angulaire entre le modèle et la figure de comparaison est nulle ($p < .0125$).

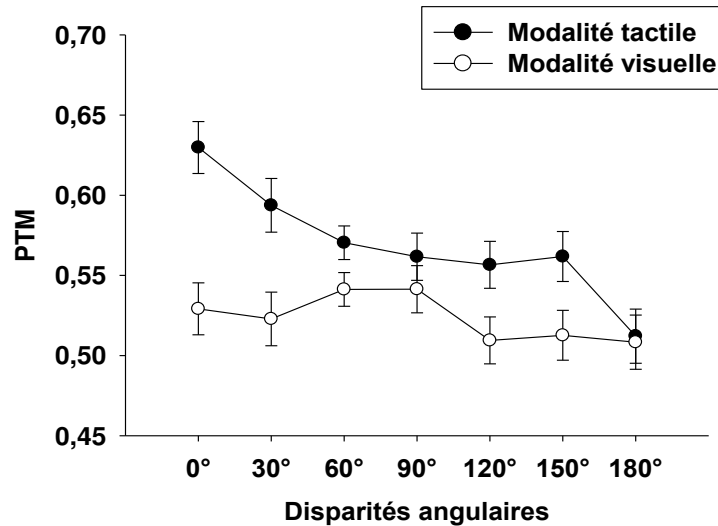


Figure 38. Proportion des temps d'inspection du modèle (PTM, avec erreurs types) à la session 2, par modalités et par disparités angulaires.

L'analyse des TC met en évidence un effet principal de la Modalité, $F(1,46)=6.4$, $\eta_p^2=0.12$, de la Condition, $F(1,46)=5.8$, $\eta_p^2=0.11$, et des Disparités angulaires, $F(6,276)=2.8$, $\eta_p^2=0.057$, $p < .05$. Les taux de changement dans la tâche tactile (4.5% : diminution significative, $t(25)=3.7$, $p < .0125$) sont plus élevés que dans la tâche visuelle (-2%). Les taux de changements sont plus faibles en condition intermodale (-2%) qu'en condition intramodale (4.4% : tendance de diminution significative, $t(25)=2$, $p < .05$). En général, les taux de changement à 180° sont significativement plus élevés que pour toutes autres disparités angulaires ($p < .0125$). Les TC pour toutes variables stratégiques, par groupes, sont présentés au Tableau 11 (p. 118).

b) Analyse de la variable Nombre de Comparaisons par Seconde entre objets (NCs)

Pour la session 1, l'analyse montre un effet principal de la Modalité, $F(1,44)=351$, $\eta_p^2=0.89$, des Disparités angulaires, $F(6,264)=8.72$, $\eta_p^2=0.16$, une interaction entre les Disparités angulaires et la Modalité, $F(6,264)=8.8$, $\eta_p^2=0.17$, une interaction entre les Disparités angulaires et la Condition, $F(6,264)=2.8$, $\eta_p^2=0.06$, et une interaction entre les Disparités angulaires, la Modalité et la Condition, $F(1,264)=2.8$, $\eta_p^2=0.06$, $p < .05$ (Figure

39). Dans la tâche tactile (0.17), les participants font moins de comparaisons par seconde que dans la tâche visuelle (2.30), pour toutes disparités angulaires ($ps < .0125$). Le nombre de comparaison par seconde diminue avec l'augmentation des disparités angulaires, seulement pour la tâche visuelle (V-V : $0^\circ > 150^\circ$; $30^\circ > 150^\circ$; $120^\circ > 150^\circ$, $ps < .05$; V-T : $0^\circ > 30^\circ > 60^\circ - 180^\circ$, $ps < .0125$), avec tendance de différence à 0° ($p < .05$) entre les deux groupes en tâche visuelle (V-T > V-V).

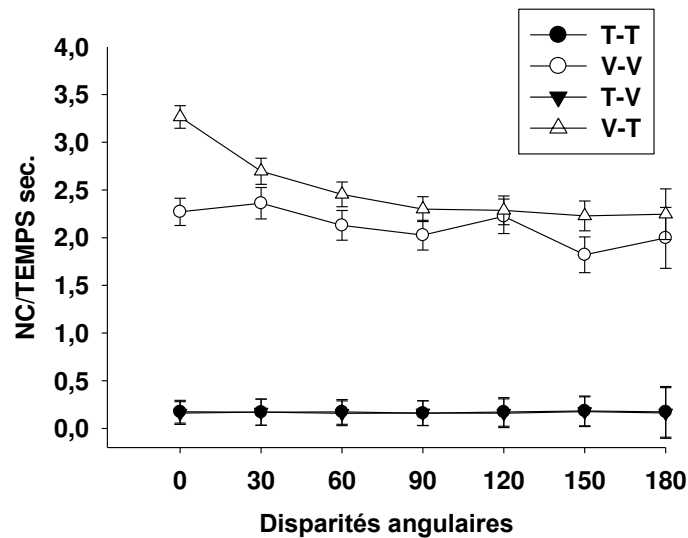


Figure 39. Nombre de comparaisons standardisé entre le modèle et l'objet de comparaison (NCs, avec erreurs types) à la session 1, par groupes et par disparités angulaires.

Pour la session 2, l'analyse montre un effet principal de la Modalité, $F(1,46)=210.5$, $\eta_p^2=0.82$, des Disparités angulaires, $F(6,276)=4.9$, $\eta_p^2=0.096$, ainsi qu'une interaction entre ces facteurs, $F(6,276)=4.1$, $\eta_p^2=0.08$, $ps < .05$ (Figure 40, p. 117). Un effet tendanciel de la Condition, $F(1,46)=3.8$, $p=.056$, $\eta_p^2=0.077$, et une interaction tendancielle entre la Modalité et la Condition, $F(1,46)=3.5$, $p=.06$, $\eta_p^2=0.07$, sont aussi observés. De façon générale, dans la tâche tactile (0.19), les participants font moins de comparaisons par seconde que dans la tâche visuelle (2), pour toutes disparités angulaires ($ps < .0125$). Le nombre de comparaisons par seconde diminue avec l'augmentation des disparités angulaires, seulement pour la tâche visuelle ($0^\circ > 120^\circ - 150^\circ$; $30^\circ > 90^\circ - 180^\circ$; $60^\circ > 120^\circ - 150^\circ$; $90^\circ > 120^\circ - 150^\circ$; $120^\circ > 180^\circ$; $150^\circ > 180^\circ$, $ps < .0125$). En moyenne, les groupes T-V (condition intermodale, 1.78) et V-V (condition intramodale, 2.27) diffèrent significativement ($p=.009$). Ce résultat suggère qu'une expérience tactile préalable influence les patrons d'inspection visuels. Les participants du groupe T-V effectuent moins de comparaisons visuelles par seconde que les participants du groupe V-V.

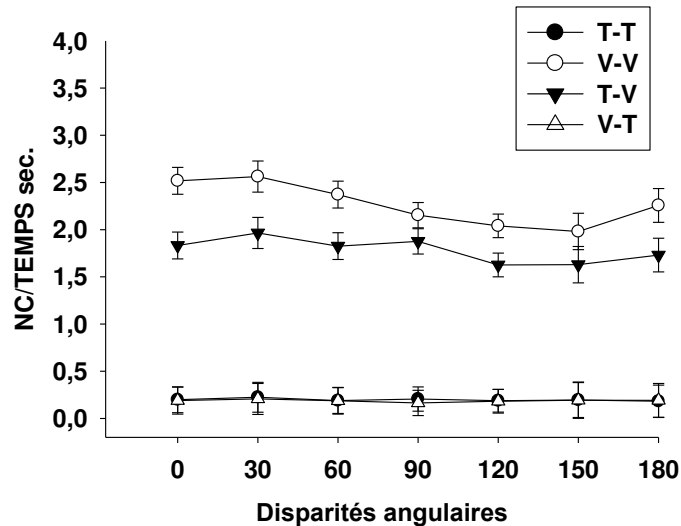


Figure 40. Nombre de comparaisons standardisé entre le modèle et l'objet de comparaison (NCs, avec erreurs types) à la session 2, par groupes et par disparités angulaires.

L'analyse des TC met en évidence un effet de la Modalité, $F(1,46)=5.74$, $\eta_p^2=0.11$, des Disparités angulaires, $F(6,276)=2.5$, $\eta_p^2=0.051$, et une interaction entre ces deux facteurs, $F(6,276)=2.6$, $\eta_p^2=0.05$, $ps<.05$. Les groupes tactiles (-18.1%) ont des taux de changement inférieurs aux groupes visuels (8%), avec plus de comparaisons par seconde comparativement aux résultats de la session 1. Seuls les taux de changements tactiles tendent à différer significativement de zéro ($t(24)=-2.1$, $p<.05$). Rappelons qu'un TC négatif dans le cadre de cette analyse signifie une augmentation du nombre de comparaisons par seconde. Ce résultat pour le groupe tactile (-18.1%) suggère que le nombre de comparaison ne diminue pas en proportion égale au temps tactile, qui rappelons-le montre les plus importants TC pour les temps de réponse ($T>V$, Expérience 2a). Par ailleurs, le nombre de comparaison est déjà très faible à la première session. Il est alors difficile d'interpréter la différence des TC entre les deux conditions sensorielles. Avec l'augmentation des disparités angulaires, des différences de TC sont aussi observées en modalité tactile ($0^\circ<30^\circ$; $30^\circ<150^\circ$, $ps<.0125$) et en modalité visuelle ($120^\circ<180^\circ$, $p<.0125$). Nous observons ainsi dans les deux modalités sensorielles une augmentation du nombre de comparaisons par seconde, de la session 1 à la session 2, aux plus fortes angulations. Seule une expérience tactile tend à causer une diminution significative des comparaisons visuelles par seconde, à la deuxième session (T-V : 19.14%, $t(13)=2.6$, $p=.02$).

c) Analyse de la variable Nombre de Fixations sur le Haut des objets par Seconde (NFHs)

Rappelons que cette analyse porte uniquement sur les mouvements oculaires (tâche visuelle). Pour la session 1, l'analyse ne révèle aucun effet significatif ($F_s < 1.6$). Pour la session 2, nous observons seulement un effet de la Condition, $F(1,23)=4.1$, $p < .05$, $\eta_p^2=0.15$, sans effet des Disparités angulaires, ni d'interaction entre ces facteurs ($F_s < 1$). Le nombre de fixations sur le haut des objets, par seconde, est plus élevé en condition intermodale (T-V : 2.6/sec.) qu'en condition intramodale (V-V : 1.7/sec.). Pour l'analyse des TC, nous observons seulement un effet principal de la Condition, $F(1,23)=4.1$, $p < .05$, $\eta_p^2=0.15$. Le nombre de fixations sur le haut des objets augmente davantage en condition intermodale (T-V : -41%), de la session 1 à la session 2, qu'en condition intramodale (V-V : 6%) et avec tendance de significativité par rapport à zéro ($t(13)=2.4$, $p=.05$).

Tableau 11. Taux de changement moyens de la première à la deuxième session (avec écarts-types), par groupes, par variable stratégique (brute et standard).

GROUPES	PTM ^a	NC ^b	NCs ^c	NFH ^d	NFHs ^e
T-T	7.2% (5.9)	16% (30.5)	-21% (52)*		
V-V	0.8% (13.3)*	17.5% (24.3)	-2% (29)*	20% (15)	6% (26)*
V-T	2% (5.7)*	19.5% (19.1)	-15% (40)*		
T-V	-6.3% (11.2)*	16% (20.1)	17.5% (26.8)	-13% (44)*	-41% (70)

*Conclusion test-t de Student : transferts non-significatifs (= 0%)

^a PTM : Proportion du temps d'inspection du modèle

^b NC : Nombre de Comparaisons entre objets (brut)

^c NCs : Nombre de Comparaisons par seconde entre objets

^d NFH : Nombre de fixations sur le haut des objets (brut)

^e NFHs : Nombre de fixations sur le haut des objets par seconde

2.2.3. Discussion :

Les variables que nous avons étudiées dans l'Expérience 2b (PTM ; NCs ; NFHs) ont permis de comparer les stratégies d'exploration visuelles et tactiles, ainsi que leur évolution, lors d'une tâche de rotation mentale. L'intérêt portait ainsi sur ce que « font » les participants lors de la résolution visuelle et tactile des paires d'objets. Globalement, nous avons observé des différences stratégiques entre modalités sensorielles. Les participants effectuent « une rotation mentale » (Expérience 2a), mais procèdent différemment par rapport à la prise des informations et à la manipulation mentale des informations (Expérience 2a), selon la modalité sensorielle utilisée. Concernant la prise des informations, ces différences se résument par des proportions de temps d'inspection du

modèle plus importantes (PTM) dans la condition tactile et davantage de comparaisons entre le modèle et l'objet de comparaison (NCs) dans la condition visuelle.

La rapidité de la prise d'information visuelle s'accompagne de mouvements oculaires de va-et-vient entre les objets, plus nombreux. Certains auteurs ont interprété cette fréquence élevée de comparaisons comme pouvant être liée à une limite de la mémoire de travail pour les informations visuo-spatiales (Carpenter & Just, 1985 ; Fitzhugh et al., 2008 ; Kosslyn et al., 2006 ; voir calepin visuo-spatiale : Baddeley, 1986 ; Baddeley & Hitch, 1974). Nous pouvons suggérer qu'en modalité tactile, une construction de la représentation globale du modèle est effectuée avant la première inspection de l'objet de comparaison, alors qu'en modalité visuelle les participants comparent probablement « pièces-par-pièces » les différentes parties des objets, avant de procéder à la rotation mentale. Ainsi, la rotation mentale visuelle serait davantage définie comme une rotation mentale de multiples parties d'objets suite à de multiples processus de comparaisons des deux objets présentés (Fitzhugh et al., 2008). La rotation mentale tactile s'effectuerait plutôt suite à une construction lente des représentations de l'objet modèle et de l'objet de comparaison, avec très peu de comparaisons par présentation de paires d'objets.

De plus, les disparités angulaires causent des effets spécifiques pour la prise d'informations tactiles et la prise d'informations visuelles (Newell et al., 2001 ; Woods & Newell, 2004 ; Volcic et al., 2010). Nous observons ainsi une diminution du temps d'inspection du modèle tactile et une diminution du nombre de comparaisons visuelles par seconde avec l'augmentation des disparités angulaires. Globalement, les analyses de la première session démontrent une spécificité des traitements visuel et tactile.

L'analyse des transferts intermodaux et intramodaux a été menée sur les variables PTM et NCs. Seuls les participants des groupes en condition intramodale diminuent les proportions de temps d'inspection de l'objet modèle de la session 1 à la session 2, cette diminution étant toutefois spécifique à la condition intramodale tactile (dépendance sensorielle).

L'analyse des tests-t de Student, suite aux corrections de Bonferonni, sur le nombre de comparaisons standard, nous permet de démontrer une tendance d'influence positive de l'expérience tactile sur les patrons de prise d'information visuelle (Tableau 11, p. 118). Ainsi, seule une expérience tactile tend à causer une diminution du nombre de comparaisons visuelles par seconde entre l'objet modèle et l'objet de comparaison, à la deuxième session. Une expérience préalable tactile tend aussi à occasionner davantage de comportements visuels d'inspection du haut des objets par seconde (NFHs). L'analyse des

transferts pour cette variable a montré un effet significatif de la Condition, ce qui était nécessaire pour démontrer une modification significative des patrons d'inspection suite à une expérience tactile. Ce résultat suggère une inspection visuelle plus holistique des objets suite à une expérience tactile (i.e., accorder plus de temps d'exploration de la forme globale, haut et bas).

En somme, cette étude démontre l'utilisation de stratégies différentes en rotation mentale, selon la modalité sensorielle d'entrée des informations. L'analyse de la session 1 montre que les différentes stratégies utilisées pour chacune des modalités sensorielles sont relativement stables. Par contre, l'analyse des transferts démontre que les stratégies utilisées lors du traitement tactile se poursuivent en modalité visuelle. Ainsi, bien que la variable TC de la vitesse de rotation mentale ne montre pas de transferts tactiles en condition visuelle (Expérience 2a), l'expérience tactile occasionne un changement du traitement cognitif de la prise des informations visuelles. Nous pouvons émettre l'hypothèse que l'influence positive tactile sur la précision visuelle (Expérience 2a) s'explique par des changements de la prise des informations visuelles (i.e., moins de comportements visuels de va-et-vient entre objets, inspection visuelle plus globale des objets) suite à une expérience tactile, ce qui contribue au développement d'une meilleure représentation visuelle²⁰. Certaines études démontrent qu'une analyse partielle d'objets ou d'analogies spatiales compromet la réussite dans certaines tâches visuo-spatiales (voir Bethell-Fox et al., 1984 ; Vigneau et al., 2006). A l'inverse, une expérience visuelle tend à influencer la manipulation mentale des représentations, tout en modifiant significativement la vitesse de traitement et le temps d'encodage, sans toutefois influencer la précision tactile (Expérience 2a). Suite à cette expérience, nous ne pouvons pas conclure que l'expérience visuelle influence significativement la prise des informations tactiles, les variables stratégiques étudiées n'ayant pas montré d'effet de l'expérience visuelle. Par conséquent, un objectif ultérieur sera de définir de nouvelles variables tactiles pour mieux évaluer les transferts stratégiques visuels en rotation mentale tactile²¹.

²⁰ Notamment, pour le groupe T-V nous obtenons une corrélation de $r=-.80$ ($p<.05$) entre TCs précision et TCs NFHs. Ainsi, considérant les transferts à l'échelle des individus du groupe T-V, l'augmentation des comportements d'inspection visuels NFHs par seconde correspond à une augmentation de la réussite, suite à une expérience tactile. Toutefois, une étude sur un plus grand nombre de participants devra être menée ultérieurement pour clarifier la relation entre les différentes variables des transferts et la nature des variables des transferts.

²¹ Le transfert visuel sur les temps de réponse tactiles et la valeur de l'intercept tactile (Expérience 2a) suggère un effet visuel sur les stratégies de traitement tactile.

2.3. Conclusion de l'Expérience 2

Les résultats de notre deuxième expérience, découlant de deux approches différentes (2a et 2b), sont particulièrement importants pour définir les similarités et les dissimilarités entre rotation mentale visuelle et rotation mentale tactile. A la première session, les temps de réponse augmentent avec l'augmentation des disparités angulaires, indépendamment de la modalité sensorielle de traitement, ce qui confirme en général l'utilisation d'une rotation mentale. Par contre, la nature de la rotation mentale, et plus particulièrement la manipulation des représentations, est spécifique ou dépendante de la modalité sensorielle utilisée (Expérience 2a).

L'analyse des transferts a mis en valeur un effet de l'expérience tactile sur la précision ou la qualité des représentations visuelles, sans toutefois influencer la vitesse de rotation mentale visuelle (pente visuelle). Une influence tactile sur les stratégies visuelles a également été observée dans la tâche de rotation mentale visuelle (Expérience 2b). Contrairement à notre étude du Test des Rotations Mentales (Expérience 1), nous ne démontrons pas d'influence visuelle sur la précision des réponses tactiles dans une tâche de rotation mentale élémentaire. Nos résultats montrent plutôt une diminution des temps de réponse tactile et de l'intercept tactile, ce qui suggère une influence plus marquée de l'expérience visuelle sur les processus de traitement tactile, sans toutefois que cette influence ne soit avantageuse. On notera dans cette étude l'influence tendancielle d'une expérience visuelle préalable sur la vitesse de rotation mentale tactile (i.e., pente tactile), qui s'effectue alors plus rapidement.

En somme, les transferts intermodaux, suite à cette étude, peuvent être décrits comme découlant principalement d'influences sur le temps imparti aux différents processus de traitement et sur les processus stratégiques. Ainsi, les représentations ou la manipulation des représentations en rotation mentale ne seraient pas nécessairement transférées d'une modalité à l'autre. L'utilisation d'une rotation mentale imagée visuelle serait alors spécifique à la modalité visuelle. La rotation mentale lors d'une exploration tactile des objets dépendrait d'un autre format de représentation et de manipulation mentale, spécifique quant à lui à la modalité tactile. L'asymétrie des différents transferts intermodaux et intramodaux ainsi que les différences stratégiques observées entre les deux modalités sensorielles appuient cette conclusion. Toutefois, d'autres études seront nécessaires pour clarifier la nature des différentes variables de transferts. Au Tableau 12,

nous résumons les résultats des transferts observés inter – et intra – modaux en rotation mentale.

Tableau 12 : Schéma des différentes conditions de transfert et résultats obtenus à la deuxième expérience (2a et 2b) avec une tâche de rotation mentale élémentaire.

Expérience 2a	Comparaison des transferts	Conclusion (ANOVA)
% de bonnes réponses	$V-V = T-T = T-V > V-T^*$	Avantage de l'expérience tactile en condition intermodale
Temps de bonnes réponses	$(V-T+T-T) > (V-V+T-V^*)$	Diminution plus forte des temps de réponse avec la modalité tactile
Intercept	$(V-T+T-T) > (V-V^*+T-V^*)$	Amélioration plus forte avec modalité tactile
Pente	$V-V = T-T = V-T^* = T-V^*$	Indépendance sensorielle

Expérience 2b	Comparaison des transferts	Conclusion (ANOVA)
PTM = Proportion temps modèle	$(V-V+T-T) > (V-T^*+T-V^*)$	Spécificité de traitement
NCs = Nombre de comparaisons par seconde	$(V-T^*+T-T^*) > (V-V^*+T-V)$	Augmentation significative des comparaisons par seconde en modalité tactile
NFHs = Nombre de fixations sur le haut des objets par seconde	$V-V^* > T-V$	Augmentation significative du nombre de fixations sur le haut des objets par seconde en condition intermodale

*Conclusion test-t de Student : transferts non-significatifs (= 0%)

Etude 1 : Discussion générale

Notre étude permet de répondre à certaines questions concernant la nature des représentations et leur manipulation mentale, en fonction des modalités sensorielles sollicitées (visuelle, tactile). A l'aide d'un paradigme de transfert intermodal, nous avons obtenu des patrons de résultats allant à l'encontre de l'hypothèse de la dominance visuelle en aptitudes spatiales (i.e., Millar & Al-Attar, 2005) et de la nécessité d'avoir recours à des images visuelles dans des tâches tactiles (i.e., Zhang et al., 2004). Nous avons plutôt démontré un traitement tactile de qualité similaire au traitement visuel (i.e., hypothèse structurale ; Reales & Ballesteros, 1999 ; Lacey & Sathian, 2008), pouvant toutefois dépendre d'une manipulation des représentations et de stratégies spécifiques.

L'hypothèse principale de notre étude découlait d'une définition des transferts intermodaux : sont communs aux deux modalités sensorielles les codes d'informations ou les processus de traitement réutilisables, indépendamment de la condition de changement, de la vue vers le toucher ou inversement du toucher vers la vue. Ainsi, en nous inspirant d'autres recherches ayant étudié les transferts intermodaux pour la reconnaissance implicite d'objets (Easton et al., 1997a ; James et al., 2002), nous avons observé que l'influence intermodale en rotation mentale (Expériences 2a et 2b) se manifeste essentiellement au niveau de l'encodage et de la prise des informations, mais pas au niveau du développement et de la manipulation de représentations mentales.

Nos résultats ne sont pas nécessairement contradictoires aux résultats découlant des recherches comportementales (Dellantano & Spagnolo, 1990 ; Prather & Sathian, 2002) et neurophysiologiques (Tagaris et al., 1998 ; Cohen et al., 1996 ; Röder et al., 1997 ; Rösler et al., 1993) qui exposent des similarités entre rotation mentale visuelle et tactile. Par contre, en utilisant un plan de comparaison intra-sujet, nous avons démontré que ces similarités ne découlent pas d'un code d'information unique (i.e., visuel) ou multisensoriel (i.e., verbal, symbolique, ou conceptuel). Nous pouvons alors parler de codes spécifiques à chacune des modalités sensorielles. La nature de la rotation mentale tactile est, de ce point de vue, différente de la rotation mentale visuelle. De surcroît, nous n'avons pas observé de correspondance parfaite entre les transferts intra – et inter – modaux, les déterminants des transferts pouvant alors varier selon la condition, sans changement ou avec changement des modalités sensorielles.

Selon Amedi et collaborateurs (2010), la controverse persiste quant à la nature des

représentations tactiles impliquées dans le traitement de formes géométriques. Cette controverse serait aussi manifeste autour du paradigme de rotation mentale :

« Recent studies show evidence of multisensory representation in the functionally normal visual cortex, but this idea remains controversial. Occipital cortex activation is often claimed to be a reflection of mental visual imagery processes triggered by other modalities. However, if the occipital cortex is genuinely active during touch, this might be the basis for the massive cross-modal plasticity observed in the congenitally blind. » (Amedi et al., 2010, p. 143)

Plusieurs auteurs ont démontré l'existence de patrons d'activation similaires au niveau des aires visuelles entre participants aveugles congénitaux et participants voyants, lors de l'exploration tactile d'objets (Amedi et al., 2010). De même, les recherches sur la rotation mentale tactile ont démontré pour ces deux groupes d'individus l'activation commune du cortex visuel pariétal (Röder et al., 1997 ; Rösler et al., 1993). Cette tradition de recherche suggère que l'imagerie visuelle n'est pas une condition nécessaire, ni suffisante, pour expliquer les similarités des résultats visuels et tactiles, en rotation mentale. Nos résultats font écho aux recherches sur les participants recouvrant la vue, suite à une correction par intervention chirurgicale (Held et al., 2011). Nous démontrons ainsi qu'une expérience tactile avec des objets non-familiers ne permet pas de transfert important en condition visuelle chez des sujets voyants. Dans ce sens, nous pouvons répondre négativement à la question classique de Molyneux (Morgan, 1977), la relation entre représentations tactiles et visuelles étant plutôt apprise, suite à des interactions répétées entre la vue et le toucher (Helbig & Ernst, 2007 ; Held et al., 2011).

Nous démontrons néanmoins que certains aspects cognitifs du traitement tactile sont transférés implicitement lorsque la tâche sollicite la modalité visuelle (transfert de stratégie). L'expérience tactile affecte plus précisément les processus visuels de la prise des informations, pouvant être impliqués dans le développement des représentations visuelles (cf. Expériences 2a et 2b, note de bas de page 19, p. 120). L'influence tactile, dans ce sens, est plus subtile que l'influence visuelle.

Les stimuli utilisés dans nos tâches peuvent expliquer l'importance moindre des transferts tactiles en condition visuelle. Les études sur la rotation mentale, ayant démontré une similarité de l'activation cérébrale pour le traitement effectué dans les deux modalités sensorielles, ont utilisé des stimuli en deux dimensions surélevées, nécessitant des stratégies exploratoires tactiles du suivi de contour, et non d'enveloppement (voir Röder et

al., 1997 ; Rösler et al., 1993). Un constat similaire est offert par Prather et Sathian (2002), concernant les études ayant utilisé des stimuli tridimensionnels :

« Although [some of] the stimuli [used in studies of tactile mental rotation] were three-dimensional, the relevant stimulus information was generally contained in only two dimensions. [...] No studies we identified utilized three-dimensional cube-assemblies similar to those represented visually by Shepard and Metzler [1971], although this type of stimulus might be a powerful trigger for mental rotation due to its complex spatial nature. » (p. 92)

Peu d'information est disponible concernant la rotation mentale sur les répliques tactiles d'objets que nous avons utilisées (sauf voir Robert & Chevrier, 2003). Or, il est tout à fait concevable que la rotation mentale tactile d'objets tridimensionnels, par enveloppement, n'active pas le même réseau cérébral comparativement à la rotation mentale visuelle ou à la rotation mentale tactile suite à un suivi des contours d'objets (James et al., 2007 ; Reed et al., 2004). Par exemple, dans une tâche de suivi de contour, moins d'effecteurs et moins de mouvements manuels sont nécessités. L'information extraite serait plus facilement retransmise sous forme de code pouvant être utilisé par la modalité visuelle ou « reperçu par les processeurs visuels » (Klatzky & Lederman, 1993 ; Reed et al., 2004 ; Volcic et al., 2010). En revanche, l'exploration tactile sur nos objets tridimensionnels a impliqué plusieurs stratégies spécifiques de prise d'information (i.e., enveloppement ; opposition index-pouce ; suivi des contours, etc., voir aussi Expérience 2b). Ces différences devront être considérées dans des recherches futures.

Nous avons observé des transferts intermodaux visuels importants au Test des Rotations Mentales tactile. L'effet facilitateur d'une expérience visuelle lors de la résolution des items tactiles démontre qu'une représentation visuelle est le plus sollicitée en cas de difficulté tactile (Expérience 1c). L'information visuelle en mémoire, dans ce contexte, peut dominer les informations tactiles (Millar & Al-Attar, 2005). Néanmoins, comme d'autres auteurs l'ont démontré (i.e., Rock & Victor, 1964), l'influence d'une représentation visuelle peut créer un conflit sensoriel ou une interférence contextuelle. Notamment, nous n'observons pas d'avantage de précision lorsque les participants persistent à utiliser une stratégie visuelle ou une représentation visuelle dans une tâche de rotation mentale tactile (Expérience 2a).

Certaines études montrent que la mémoire tactile est plus instable que la mémoire visuelle (i.e., Bliss & Hamalainen, 2005 ; Connolly & Jones, 1970 ; Posner, 1967), le rappel d'informations étant inférieur suite à un traitement tactile. Pour les deux tâches que

nous avons étudiées, si l'information perceptive d'objets tridimensionnels tactiles prend un format différent du format visuel, lorsque représentée en mémoire, ceci peut considérablement perturber les transferts intermodaux (Hatwell, 2000b ; Easton et al., 1997a ; James et al., 2002). Un format différent des représentations en mémoire contribuerait ainsi à l'impossibilité de transférer des informations tactiles lors du traitement visuel, tel que rapporté dans notre étude. Une différence importante est liée à la vitesse d'encodage, le traitement séquentiel tactile étant plus lent que le traitement visuel. Un contrôle de la vitesse de traitement pourrait occasionner une similarité de la mémorisation visuelle et tactile plus importante (Bliss, Kujala, & Hamalainen, 2004 ; Loomis, Klatzky, & Lederman, 1991) pour des stimuli en deux dimensions, ce qui peut expliquer l'équivalence des transferts de reconnaissance dans certaines études (Easton et al., 1997a ; Easton et al., 1997b).

Nous constatons par ailleurs que différentes stratégies sont utilisées pour résoudre les analogies spatiales des tâches de rotation mentale (voir Caissie et al, 2009 ; Geiser et al., 2006 ; Kozhevnikov et al., 2005). Les processus de résolution peuvent varier d'un individu à l'autre. Certains participants privilégient des stratégies spatiales aux stratégies visuelles (Geiser et al., 2006). Nous avons aussi démontré l'utilisation de différentes stratégies en fonction des caractéristiques d'items du MRT (i.e., miroir, structural, homogène, hétérogène, etc. voir aussi Voyer & Hou, 2006 ; Shiina & Suzuki, 1999). De même, au moins deux stratégies peuvent être utilisées dans une tâche plus élémentaire de rotation mentale (spatiale vs. visuelle ; Kozhevnikov et al., 2005). Enfin, certains participants n'utiliseraient pas la rotation mentale (Geiser et al., 2006).

Les différences stratégiques peuvent en partie expliquer la variabilité distributionnelle de nos variables de transfert, et particulièrement en ce qui a trait aux transferts sur la pente ou la vitesse de rotation mentale. Le transfert des informations suggère aussi une facilitation implicite et une abstraction des différences, ou spécificités, entre modalités sensorielles (Hatwell, 2000b). Dans notre étude, certains participants ont obtenu des améliorations largement supérieures aux autres, et ce, dans les deux sens de transferts intermodaux (T-V, V-T). Par conséquent, le transfert intermodal peut être perçu comme une capacité individuelle (voir aussi Rose, Feldman, Futterweit & Jankowski, 1998). Nous devons ainsi considérer les différences inter-individuelles dans de nouvelles études des transferts intermodaux en rotation mentale. Notamment, une meilleure compréhension des déterminants individuels des transferts et une clarification de la nature des différentes variables de transferts en rotation mentale sont souhaitables.

Comme le souligne Hatwell (2000b, p. 212), l'interprétation de la spécificité de traitement basée sur l'inégalité des conditions intermodales et intramodales peut exposer « une conception manichéenne » des relations intermodales. En adoptant une telle conception des relations intermodales, nous pouvons vite tomber dans le piège de l'hypothèse nulle concernant l'équivalence sensorielle (Gibson 1966, cf. section 1.6. ; Hatwell, 1994). En juxtaposant les variables des transferts à des processus cognitifs distincts, sensés être révélés par ces variables (i.e., pente), nous voulions évaluer la correspondance entre modalités sensorielles, pour des processus de traitement identifiables (Egan, 1978). Or, le passage de l'observation des transferts intermodaux, pour ces variables, à la définition des processus de traitement dissimilaires dans les deux modalités sensorielles peut être délicat. Notamment, la présence ou l'absence des transferts intermodaux peut découler de facteurs n'ayant pas été pris en compte dans cette étude. D'autres études intégrant un plus grand nombre de participants seront nécessaires pour évaluer l'approche des transferts intermodaux en rotation mentale.

Etude 2 : L'effet du changement de tâches de rotation mentale en fonction de l'âge : la résolution d'une tâche d'imagerie visuelle et d'imagerie motrice dépend-elle de représentations et de stratégies spécifiques ?

3.1. Remarques préliminaires

L'étude que nous présentons dans cette section découle d'une collaboration de recherche entre l'équipe ATCO de Poitiers et l'équipe VIME de Tours. Une partie de l'étude était initialement prévue pour évaluer l'effet du vieillissement normal et de la sédentarité sur les stratégies d'imagerie mentale visuelle (système occipito-pariétal) et motrice (système fronto-pariétal), par des analyses intergroupes. Pour ce faire, des participants jeunes et âgés ont effectué, dans une partie du protocole, deux tâches différentes de rotation mentale présentées à dix minutes d'intervalle. L'ordre des tâches a été contrebalancé : les participants ont effectué soit une tâche de rotation mentale visuelle, suivie d'une tâche de rotation mentale motrice, ou l'inverse.

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous utiliserons les données de cette expérience pour investiguer les effets d'une expérience préalable (imagerie visuelle-imagerie motrice/imagerie motrice-imagerie visuelle) chez les sujets jeunes et âgés. Nous sommes conscients des lacunes méthodologiques que peut présenter une telle approche, compte tenu de l'absence de groupes contrôles (2 sessions successives d'imagerie visuelle, 2 sessions successives d'imagerie motrice) nécessaires à l'interprétation nuancée des résultats : effet de la répétition d'une tâche d'imagerie ou effet d'une expérience préalable spécifique. Les résultats tels que nous les présentons dans la suite du document se heurtent donc à une certaine limite. Bien qu'ils puissent offrir un portrait préliminaire des effets ou non du changement de tâches, en fonction de l'âge, ils devront être interprétés avec une certaine précaution. De ce fait, l'étude présentée ici correspond à une version préliminaire d'une étude que nous mènerons ultérieurement pour corriger cette limite.

3.2. Introduction générale et contexte

3.2.1. Imagerie visuelle versus imagerie motrice

La rotation mentale visuelle est liée à la capacité de faire tourner l'image mentale visuelle d'un objet de deux ou de trois dimensions dans l'espace tridimensionnel mental (Cohen & Blair, 1998 ; Hoyek, Collet, & Guillot, 2010 ; Shepard & Metzler, 1971). Nous

pouvons créer une image mentale visuelle d'un objet et la faire tourner en lui appliquant une transformation mentale. Cette transformation mentale serait similaire à une transformation appliquée sur l'orientation physique d'un objet, par exemple, lorsque nous le tournons avec notre main dans un espace physique défini (Shepard & Metzler, 1971).

Des études récentes démontrent que la rotation mentale peut dépendre de traitements sur différents formats (i.e., spatiaux ou visuels) de représentations (Farah et al., 1988 ; Kozhevnikov et al., 2005). L'étude de sujets aveugles démontre notamment qu'il n'est pas nécessaire d'avoir recours à des images visuelles pour effectuer une rotation mentale (Carpenter & Eisenberg, 1978 ; Marmor & Zaback, 1976). Pour des sujets voyants, la rotation mentale effectuée sur des stimuli tactiles ne dépendrait pas nécessairement de l'élaboration préalable d'une représentation visuelle (cf. Etude 1 ; Toussaint, Caissie et al., 2012).

Dans cette deuxième étude nous nous intéressons à la rotation mentale effectuée sur des stimuli non corporels ou corporels (Parsons, 1987, 1994 ; Shepard & Metzler, 1971). La rotation mentale peut dépendre de deux stratégies d'imagerie mentale : l'imagerie visuelle et l'imagerie motrice, la première étant considérée la plus manifeste lors de transformations mentales appliquées sur des stimuli non corporels (i.e., objets tridimensionnels), la deuxième étant considérée la plus manifeste lors de transformations mentales appliquées sur des parties corporelles (i.e., mains, pieds) ou le corps en entier (Amorim, Isableu, & Jarraya, 2006).

Selon Zacks et Michelon (2005), la transformation de l'image mentale d'un objet est centrée-sur-l'objet. Ainsi, la rotation mentale d'un objet fait changer uniquement la position de l'objet. On peut dire que la rotation mentale visuelle implique une transformation allocentrique, dans une tâche de comparaison et de décision présentant deux objets, un modèle et un objet de comparaison avec disparités angulaires variables de positionnement (i.e., 0°-180°). Dans le cas de présentations de paires d'objets identiques (Cohen et al., 1996), plus les disparités angulaires entre les deux objets augmentent, plus la rotation mentale serait nécessaire pour réorienter un des objets en position mentale congruente, avant d'émettre une réponse.

Récemment, des études neurophysiologiques ont démontré la possibilité d'utiliser une stratégie motrice lors de la résolution de certaines tâches de rotation mentale. Dans plusieurs de ces études les expérimentateurs présentaient des stimuli illustrant des parties du corps humain (mains, pieds ; i.e., Bonda, Petrides, Frey, & Evans, 1995 ; Ganis, Keenan, Kosslyn, & Pascual-Leone, 2000 ; Kosslyn, DiGirolamo, Thompson, & Alpert,

1998 ; Parsons et al., 1995). La résolution d'une tâche avec stimuli corporels implique généralement l'activation des zones motrices du cerveau telles les aires prémotrices (PMA) et le cortex moteur primaire (M1). Par exemple, une tâche de latéralité manuelle ou de rotation mentale motrice a été utilisée dans laquelle un participant doit décider si un dessin d'une main désorientée est une main gauche ou une main droite (voir Figure 41 ; Cooper & Shepard, 1975 ; Parsons, 1987, 1994 ; Parsons et al., 1995). Parsons (1987) émettait l'hypothèse que les participants comparent la rotation de leur propre main à celle du stimulus présenté, pour émettre une réponse. La composante motrice impliquée dans la résolution de cette tâche serait liée à la simulation mentale du mouvement de notre propre main (Jeannerod, 1995, 2001), la comparaison des coordonnées d'une référence corporelle à une autre ayant été décrite comme une transformation égocentrique, centrée-sur-le-corps (Howard, 1982 ; Parsons, 1994 ; Zacks & Michelon, 2005). Plus le dessin de la main est désorienté, plus un participant met de temps avant de répondre. Il utiliserait alors une simulation mentale du mouvement physique de sa propre main jusqu'à superposition sur le dessin ou le stimulus corporel présenté (i.e., le temps de la simulation mentale est fortement corrélé au temps de mouvement physique : Parsons, 1994).



Figure 41. Dessin d'une main désorientée dans le plan (75°, rotation vers la gauche) par rapport à la position verticale (d'après Parsons, 1987). Dans une tâche de latéralité manuelle (rotation mentale motrice), les participants décident s'il s'agit d'une main droite ou d'une main gauche.

La rotation mentale visuelle sollicite préférentiellement le système occipito-pariétal (Cohen et al., 1996 ; Kosslyn et al., 1998 ; Röder et al. 1997 ; Rösler et al., 1993) et la rotation mentale motrice sollicite préférentiellement le système fronto-pariétal (Amick et al., 2006 ; Ganis et al., 2000 ; Kosslyn et al., 1998 ; Parsons, 2003 ; Wraga, Thompson, Alpert, & Kosslyn, 2003). Le réseau du traitement des représentations associé à une rotation mentale visuelle correspond aux zones de traitement d'informations perceptuelles

visuelles, ce qui suggère une correspondance des processus perceptifs visuels et des processus imagés visuels (Hoyek et al., 2009 ; Kosslyn et al., 2006 ; Zacks & Michelon, 2005). Découlant de la théorie de la simulation (Jeannerod, 1995, 2001), la rotation mentale motrice serait en quelque sorte comme la simulation interne d'un mouvement exécuté physiquement. L'imagerie motrice serait considérée comme le niveau cognitif du traitement des actions physiques de notre propre corps, impliquant des représentations sensorimotrices dans la planification et la préparation d'un mouvement.

Penfield et Rasmussen (1950) démontraient déjà que la stimulation des zones motrices primaires et du cortex pré-moteur ne suscite pas de représentation visuelle. Les transformations égocentriques seraient spécifiquement appliquées sur des représentations kinesthésiques et somatosensorielles. Une étude neurophysiologique avec des patients ayant subi une callosotomie a aussi démontré l'impossibilité d'identifier des mains gauches et des mains droites présentées respectivement aux hémisphères gauches et droits, suggérant qu'une bonne performance à une tâche de latéralité manuelle dépend d'une représentation motrice dans l'hémisphère controlatéral de la main illustrée (Parsons, Gabrielli, Phelps, & Gazzaniga, 1998 ; voir aussi Tomasino & Rumiati, 2004 ; Tomasino, Toraldo, & Rumiati, 2003). D'autres études (Sirigu et collaborateurs, 2001, 1996) ont démontré que l'identification de mains n'est pas affectée lors d'une lésion du cortex pariétal ou lors de l'impossibilité d'utiliser l'imagerie visuelle : on présente ainsi une dissociation clinique entre imagerie visuelle et imagerie motrice.

3.2.2. *Etudes concernant l'échange des stratégies visuelle et motrice*

Certaines données montrent néanmoins que les représentations motrices peuvent être sollicitées lors d'une tâche d'imagerie mentale visuelle et spécialement pour des transformations centrées-sur-l'objet (Sirigu & Duhamel, 2001 ; Zacks & Michelon, 2005). Notamment, bon nombre d'études montrent la participation des zones motrices pour la rotation mentale visuelle (Richter, Ugurbil, Georgopoulos, & Kim, 1997 ; Tagaris et al., 1997 ; pour une revue, voir Vingerhoets, de Lange, Vandemaele, Deblaere, & Achten, 2002). L'implication d'une stratégie motrice pourrait signifier qu'un participant imagine l'implication de ses mains dans la manipulation des objets présentés visuellement (Hoyek et al., 2003 ; Wraga et al., 2003), nécessitant une simulation motrice « jumelée » à la rotation mentale visuelle. Toutefois, l'implication des stratégies motrices demeure controversée (Corinne & Mast, 2005), certains auteurs allant jusqu'à suggérer que

l'activation des zones antérieures pré-motrices en rotation mentale visuelle découle de la préparation et de la planification de l'émission de la réponse pour l'appui de la main sur un bouton de réponse (rapporté dans Hoyek et al., 2003 et Zacks & Michelon, 2005).

Dans une étude, Kosslyn et collaborateurs (2001) ont demandé aux participants d'un groupe expérimental d'imaginer l'implication de leurs propres manipulations manuelles d'objets visuels, tout en appliquant une rotation mentale visuelle centrée-sur-l'objet, durant une première phase d'entraînement. Le groupe contrôle recevait la consigne d'effectuer « passivement » la tâche durant la phase d'entraînement. Les deux groupes ont ensuite effectué une tâche de rotation mentale d'objets. Le cortex primaire moteur était seulement activé dans la phase test pour le groupe expérimental, ce qui dénote l'utilisation d'une stratégie motrice lors d'une tâche de rotation mentale visuelle. Une autre étude a été menée deux ans après par Wraga et collaborateurs (2003). Les participants d'un groupe contrôle effectuant deux sessions d'une même tâche visuelle de rotation mentale d'objets (Objet-Objet) ont été comparés aux participants d'un groupe expérimental effectuant la tâche motrice dans une première session, suivie d'une tâche visuelle dans la deuxième session (Main-Objet). En comparant l'activité cérébrale des deux groupes dans la deuxième session, seuls les participants du groupe avec une expérience préalable motrice ont montré des patrons d'activation des régions motrices (parties du système fronto-pariétal). Une autre étude va dans le même sens que les études ci-mentionnées : une activation motrice est démontrée dans une tâche de rotation mentale d'objets tridimensionnels (Kawamichi, Kikuchi, Noriuchi, Senoo, & Ueno, 2007). Des études utilisant des présentations de paires de mains ont aussi démontré la possibilité d'utiliser une stratégie visuelle dans une tâche d'imagerie motrice (Bode, Koeneke, & Jäncke, 2007 ; Zacks, Ollinger, Sheridan, & Tversky, 2002).

L'hypothèse de Wraga et collaborateurs (2003), concernant la tâche de rotation mentale d'objets, était la suivante :

« We hypothesized that participants can perform mental rotation in two ways, either by imagining themselves rotating the object [egocentric] or by imagining an external force rotating it [allocentric], and that the strategy they adopt depends in part on what they have been doing immediately prior to the task. » (p. 136)

Wraga et collaborateurs (2003) n'ont pas rapporté d'effets particuliers du changement d'une tâche motrice à une tâche visuelle sur leurs données comportementales (précision et temps de réponse), avec un groupe de jeunes adultes. En revanche, l'activation des aires motrices lorsque la tâche visuelle est réalisée après la tâche motrice a été interprétée

comme résultant d'un transfert d'une stratégie motrice dans une tâche d'objets. Dans cette étude, les auteurs n'ont hélas pas évalué l'effet de l'expérience préalable d'une tâche visuelle sur une tâche motrice.

3.2.3. Résumé et objectifs

En résumé, selon les différentes études mentionnées dans les sections précédentes, deux stratégies distinctes d'imagerie peuvent être utilisées, soit une stratégie visuelle, soit une stratégie motrice. Toutefois, nous recensons peu ou pas d'études comportementales ayant évalué les transferts bi-directionnels des stratégies d'imagerie. Ainsi, l'influence d'une expérience stratégique préalable mérite d'être investiguée davantage, pour savoir si le changement de tâches visuelle à motrice, ou inversement, occasionne l'implication d'une stratégie visuelle dans une tâche motrice et/ou l'implication d'une stratégie motrice dans une tâche visuelle. En utilisant un plan de comparaison intra-sujet, en comparant des groupes effectuant soit une tâche motrice suivie d'une tâche visuelle ou inversement une tâche visuelle suivie d'une tâche motrice, nous évaluerons la possibilité d'observer un effet du changement de tâche de rotation mentale. Ainsi, nous souhaitons évaluer la question de la dépendance/indépendance des stratégies visuelle (pour la tâche d'objets) et motrice (pour la tâche de mains). La stratégie visuelle influence-t-elle la stratégie motrice et la stratégie motrice influence-t-elle la stratégie visuelle ? Un autre objectif sera d'évaluer l'effet du vieillissement normal sur la rotation mentale ou la capacité d'imagerie mentale. Autrement dit, les performances aux deux tâches visuelle et motrice, pouvant reposer chacune sur une stratégie d'imagerie mentale spécifique, varient-elles en fonction de l'âge ? Enfin, aucune étude sur le vieillissement normal n'a à ce jour évalué l'effet de l'âge sur les stratégies de rotation mentale, et notamment l'effet de l'âge sur les transferts implicites entre imagerie visuelle et imagerie motrice. La section suivante concerne la justification d'étudier ces questions en intégrant le facteur lié à l'âge.

3.2.4. Les effets du vieillissement *sur l'imagerie mentale*

Le cerveau humain change continuellement au cours d'une vie. Les personnes âgées montrent une réorganisation neuronale et fonctionnelle (Reuter-Lorenz & Lustig, 2005), source potentielle de modifications comportementales majeures : les personnes âgées sont moins performantes dans différentes tâches cognitives et sensorimotrices que

les personnes jeunes (Hoyer & Verhaeghen, 2006 ; Newell, Vaillancourt, & Sosnoff, 2006). Généralement, les personnes âgées réussissent moins bien des tâches d'imagerie visuelle (Band & Kok, 2000 ; Dirx & Craik, 1992 ; Dror & Kosslyn, 1994) et des tâches d'imagerie motrice (Saimpont, Pozzo, & Papaxanthis, 2009 ; Skoura, Papaxanthis, Vinter, & Pozzo, 2005). Des études démontrent que la simulation motrice, nécessitant l'implication d'une stratégie égocentrique, est davantage perturbée (Mulder, Hochstenbach, van Heuvelen, & den Otter, 2007), comparativement à l'exécution physique de mouvements et à l'imagerie mentale d'un mouvement effectué par une tiers personne (Skoura et al., 2005). Ces derniers processus demeurent relativement intacts comparativement à la simulation interne égocentrique qui montre un déclin progressif. Cette distinction est importante puisque nous savons, du point de vue de la réhabilitation (suite à un infarctus par exemple), que l'imagerie mentale égocentrique joue un rôle plus important dans l'apprentissage ou le transfert comparativement à l'imagination d'un point de vue allocentrique ou externe (Jackson, Lafleur, Malouin, Richards, & Doyon, 2001 ; Mulder et al., 2007 ; Malouin, Belleville, Richards, Desrosiers, & Doyon, 2004).

Des auteurs expliquent que les effets délétères du vieillissement normal sur les capacités d'imagerie mentale sont liés au cortex pariétal vieillissant (Skoura et al., 2005) et à une perte des processus de la mémoire de travail et de l'attention (Briggs, Raz, & Marks, 1999 ; Raz, 2000) pour lesquels un fonctionnement optimal des zones frontales demeure crucial (West, 1996). Sachant que le système fronto-pariétal est préférentiellement activé lors d'une tâche d'imagerie motrice, nous pouvons ainsi mieux comprendre l'effet délétère du vieillissement sur ce système d'imagerie mentale. Toutefois, il est possible que les pertes soient liées à un ralentissement cognitif plus général, une perte importante étant aussi démontrée du point de vue de l'imagerie visuelle (Dror & Kosslyn, 1994). Des études suggèrent aussi que la perte progressive de l'imagerie mentale serait liée à une baisse significative de l'activité physique et à un mode de vie sédentaire chez ce groupe d'âge (Mulder et al., 2007 ; Skoura et al., 2005). Nous savons aussi qu'une baisse d'activités physiques contribue à une perte importante des représentations corticales sensorimotrices (Liepert, Tegenthoff, & Malin, 1995 ; Zanette, Tinazzi, Bonato, di Summa, Manganotti, Polo, & Fiaschi, 1997). Les changements dans l'organisation du cortex sensorimoteur causent des modifications notamment du point de vue de l'acquisition d'habiletés motrices, pouvant le plus toucher les personnes âgées.

3.2.5. *Etudes sur l'immobilisation et les capacités d'imagerie mentale*

Comme il est démontré particulièrement pour les personnes âgées une baisse d'activités physiques et une perte des représentations sensorimotrices, il est intéressant de considérer l'effet de l'inactivité, ou de l'immobilisation physique, chez les jeunes adultes. Des résultats récents démontrent chez de jeunes adultes une perte des représentations sensorimotrices suite à l'immobilisation de courte durée appliquée aux membres corporels supérieurs (i.e. Facchini, Romani, Tinazzi, & Aglioti, 2002 ; Huber, Ghilardi, Massimini, Ferrarelli, Riedner, Peterson, & Tononi, 2006 ; Moissello, Bove, Huber, Givovanni, Battaglia, Tononi, & Gilhardy, 2008 ; Toussaint & Meugnot, 2012). Notamment, Moissello et collaborateurs (2008) ont suggéré que l'altération des mouvements de la main et des articulations, suite à une immobilisation de courte durée (12hrs), pouvait contribuer à un changement ou à une difficulté dans le rappel sensorimoteur, en raison d'un traitement réduit des signaux proprioceptifs. Les effets d'une privation sensorimotrice de courte durée, sur les performances motrices subséquentes, seraient davantage causés par des changements d'organisation des zones sensorimotrices, et non par des changements des structures musculaires périphériques (Facchini et al., 2002). Ces derniers apparaissent plus tardivement (i.e., quelques semaines). L'inactivité relative de certaines personnes âgées, comparés aux jeunes, pourrait ainsi favoriser des pertes, découlant d'une réorganisation des structures centrales des zones sensorimotrices, et/ou des structures musculaires périphériques.

Dans une autre étude effectuée récemment dans notre laboratoire auprès d'une population de jeunes adultes, l'immobilisation de courte durée (48hrs) de la main non-dominante a engendré une modification significative des processus d'imagerie motrice, cette modification étant latéralisée sur la main immobilisée (Toussaint & Meugnot, 2012). Cet effet de l'immobilisation corporelle affecte sélectivement le système sensorimoteur (imagerie motrice de main), les performances d'imagerie visuelle (i.e., rotation mentale de stimuli non-corporels) n'étant pas affectées. De plus, l'immobilisation conduit les participants à abandonner une stratégie d'imagerie motrice lorsqu'une stratégie d'imagerie visuelle a été réalisée au préalable (Transfert IV→IM). L'absence imposée d'activités physiques, même pour une courte durée (48hrs), contribue ainsi à l'altération des représentations sensorimotrices due à une perte de feedback proprioceptif, ce qui occasionne un ralentissement des processus d'imagerie motrice et l'implication potentielle d'une stratégie visuelle dans une tâche de rotation mentale motrice. La difficulté de

représenter la main immobilisée aurait mené les participants jeunes à utiliser une stratégie visuelle, par défaut, dans ce contexte, puisque l'imagerie visuelle n'a pas été affectée par l'immobilisation de la main. Ces effets laissent prévoir de possibles changements ou modifications des stratégies d'imagerie mentale (strategy shift) chez des participants plus âgés, en fonction de l'expérience immédiate préalable, spécialement si les tâches présentées causent une difficulté significative. L'intérêt d'utiliser les tâches d'imagerie mentale est qu'elles permettent de distinguer l'analyse des processus de traitement relatifs aux valeurs de pentes des processus de traitement relatifs aux valeurs d'intercepts, pour évaluer l'effet du vieillissement (l'inactivité/immobilisation) sur le traitement des représentations mentales, d'une part, et sur le traitement physique lié à l'encodage et à la programmation des réponses lors de la tâche, d'autre part.

3.2.6. Objectifs et quelques prédictions *concernant l'effet du changement*

Dans l'Etude 2, nous comparerons les performances des participants jeunes aux performances des participants âgés, dans une tâche de rotation mentale visuelle et dans une tâche de rotation mentale motrice. Nous étudierons ensuite l'effet du changement des tâches, en fonction de l'âge.

Les résultats récents concernant l'immobilisation de courte durée de segments corporels (Toussaint & Meugnot, 2012) permettent quelques prédictions. Toussaint et Meugnot (2012) ont observé que l'immobilisation pouvait occasionner l'utilisation d'une stratégie visuelle lors de la tâche motrice. Il est possible que nous observions un patron similaire pour les personnes âgées dans notre étude. Les personnes âgées montrent une dégradation importante des processus d'imagerie motrice (Skoura et al., 2005 ; Mulder et al., 2007) ce qui suggère une altération des représentations sensorimotrices (Mulder et al., 2007). Les personnes âgées seraient ainsi davantage portées à conserver une stratégie visuelle préalablement utilisée pour éviter les difficultés liées à l'imagerie motrice.

Cependant, nous n'avons aucune raison théorique d'attendre seulement un effet du changement d'une tâche visuelle à une tâche motrice. Premièrement, l'étude neurophysiologique de Wraga et collaborateurs (2003) a montré un transfert implicite d'une stratégie motrice dans une tâche visuelle chez des adultes jeunes. Deuxièmement, les structures frontales du cerveau sont sensibles aux effets du vieillissement. On sait que les fonctions exécutives responsables de l'adaptation au changement et de la flexibilité cognitive dépendent des structures frontales (Ridderinkhof, Span, & van der Molen, 2002).

Troisièmement, pour les personnes âgées les informations découlant d'une tâche préalable interfèrent avec le traitement subséquent dans une tâche différente (De Jong, Berendsen, Cools, 1999 ; Hasher & Zacks, 1988 ; Kramer, Larish, & Strayer, 1999 ; Kramer, Larish, & Strayer, 1995 ; Ridderinkhof & Van der Molen, 1997 ; West & Craik, 1999). Ainsi, les personnes âgées seraient plus affectées par le changement, peu importe la condition.

3.3. Présentation de l'étude 2

Dans cette étude, une comparaison des performances d'adultes jeunes et âgés, dans des tâches d'imagerie visuelle et d'imagerie motrice, a été effectuée selon un plan expérimental intra-sujets (i.e., Gentili et al., 2010 ; Toussaint, Caissie et al., 2012 ; cf. Etude 1, pour l'intérêt des plans expérimentaux intra-sujets). Les participants avaient pour tâche de juger de la similitude ou différence de deux objets dans la tâche de rotation mentale visuelle ou de deux mains dans la tâche de rotation mentale motrice, les stimuli étant présentés visuellement. Tous les participants ont effectué soit la tâche d'imagerie visuelle (objets) ou motrice (mains) dans une première session, suivie immédiatement d'un changement de tâche (session 2). Nous avons ainsi évalué l'effet de l'âge sur les capacités d'imagerie visuelle et motrice, ainsi que l'effet du contrebalancement de l'ordre de présentation des tâches²².

Généralement, plus les disparités angulaires augmentent pour des paires de stimuli, plus les erreurs sont fréquentes, et plus les temps de réponse sont longs, que la tâche soit visuelle (Cooper & Shepard, 1973 ; Shepard & Metzler, 1971) ou motrice (Zacks et al., 2002 ; et tactile cf. Etude 1). Ces données comportementales suggèrent dans les deux tâches l'utilisation de l'imagerie mentale, les traitements pouvant toutefois être spécifiques du point de vue d'études neurophysiologiques (Amick et al., 2006 ; Ganis et al., 2000 ; Kosslyn et al., 1998 ; Parsons, 2003). Aucune étude comportementale n'a à ce jour évalué les transferts possibles entre stratégies et de façon correspondante l'effet de l'âge sur le changement des tâches. Outre l'analyse des scores de précision (i.e., qualité des représentations) et des temps de réponse (i.e., temps imparti aux différents processus de traitement), l'intérêt de ces tâches réside dans la possibilité d'analyser séparément les valeurs relatives à la pente (i.e., processus liés à la manipulation mentale de l'information ou à la rotation mentale) et à l'intercept (i.e., processus liés à l'encodage, à la prise de décision et à l'émission de la réponse).

²² Rappelons qu'une limite de cette étude est liée à l'absence de conditions contrôles, ou groupes réalisant deux sessions successives sans changement de tâches (visuelle et motrice).

La présentation des tâches de la première session nous permet de comparer la performance des participants, sans expérience préalable. En général, nous attendons un avantage des participants jeunes dans les deux tâches étudiées. La session 2, quant à elle, permet d'évaluer l'effet d'une tâche préalable sur une autre tâche, chacune sollicitant une stratégie d'imagerie qui lui est propre. Nous souhaitons ainsi évaluer la question de la dépendance/indépendance stratégique dans les deux tâches. La stratégie visuelle influence-t-elle la stratégie motrice et la stratégie motrice influence-t-elle la stratégie visuelle ? Concernant les personnes jeunes, des résultats comportementaux (i.e., précision et temps de réponse) n'ont pas permis de démontrer d'effet de transfert dans le changement des tâches d'imagerie mentale (Wraga et al., 2003). Ainsi, nous n'attendons pour ce groupe d'âge aucune différence entre performances effectuées sans expérience préalable et les performances en deuxième session. En revanche, pour les personnes âgées lors de la deuxième session, si un système d'imagerie mentale est plus fortement affecté par l'âge (i.e., stratégie motrice), alors cette difficulté conduira à l'utilisation de la stratégie déjà utilisée lors de la session 1, telle que suggérée par un transfert (positif et/ou négatif) dans le changement des tâches. En général, les performances des personnes âgées seront davantage affectées (session 2) par l'expérience préalable (session 1).

3.3.1. Méthode :

Soixante-et-un participants jeunes (31 femmes et 30 hommes ; âge moyen = 21.86 ± 2.3 ans) et soixante participants âgés (32 femmes et 28 hommes ; âge moyen = 70.3 ± 5.1 ans) ont participé volontairement à cette étude. Tous les participants étaient droitiers, et tous ont rapporté une vision normale ou normale corrigée. Les participants jeunes étaient issus d'une population étudiante. Les personnes âgées ont été recrutées dans des centres communautaires et des groupes civiques d'une ville de taille moyenne (90000hab.). Les critères d'inclusion des participants âgés étaient les suivants : a) Score au MMSE > 26 (Hébert, Bravo, & Girouard, 1992) ; b) Score à l'Echelle Gériatrique de Dépression < 11 points (Bourque, Blanchard, & Vézina, 1990). Les critères d'exclusion étaient les suivants : a) Médicamentation pouvant affecter le fonctionnement cognitif ; b) Historique personnel avec maladies cardiovasculaires ou neurologiques. Tous les participants ont

rempli un formulaire de consentement et l'étude a été approuvée par un comité d'éthique local²³.

a) Tâche et dispositif expérimental

Des figures de mains ont été utilisées pour la tâche de mains. Quatre dessins de mains gauches ont été créés comme modèles (Figure 42a, p. 140). Chaque main modèle a été répliquée 9 fois, modulo une rotation autour d'un axe vertical s'incrémentant de 20° (20°, 40°, 60°, 80°, 100°, 120°, 140°, 160° et 180°). L'image miroir de ces 9 répliques a également été réalisée, correspondant alors à des images de mains droites. Les mains ont ensuite été assemblées par paires, cet assemblage formant soit des paires "identiques" (Figure 42 : A), soit des paires "différentes" (Figure 42 : B). Dans l'élaboration de ces paires, les mains modèles se situent toujours à gauche, leur réplique, modulo la rotation réalisée ou une présentation en miroir, se situant à droite. Au total, 72 paires de stimuli de mains ont été créées (36 paires "identiques", 36 paires "différentes" ; cf. Amick, et al., 2006, pour une procédure similaire).

Des objets similaires à ceux de Shepard et Metzler (1971) ont été utilisés pour la tâche d'objets. Chaque objet est constitué d'un assemblage de 9 ou 10 cubes collés face contre face de manière à former une figure structurée par quatre segments et constituée d'exactly trois angles droits formant un objet en trois dimensions. Quatre dessins d'objets différents ont été créés pour minimiser l'effet de la pratique (Figure 42b). Chaque objet a été répliqué 9 fois, modulo une rotation par rapport à un axe vertical s'incrémentant de 20° (20°, 40°, 60°, 80°, 100°, 120°, 140°, 160° et 180°). L'image miroir de ces 9 répliques a également été réalisée. Les objets ont ensuite été assemblés par paires, cet assemblage formant soit des paires "identiques" d'objets (seule une rotation autour d'un axe vertical différencie les 2 figures ; Figure 42b : A), soit des paires "différentes" (rotation par rapport à un axe vertical + image miroir ; Figure 42b : B). Dans l'élaboration de ces paires, les objets modèles se situent toujours à gauche, leur réplique modulo la rotation réalisée ou leur présentation en miroir, se situant à droite. Au total, 72 paires de stimuli d'objets ont été créées (36 paires "identiques", 36 paires "différentes" ; cf. Amick et al., 2006, pour une procédure similaire).

²³ Dans la planification initiale de cette étude, le niveau d'activité physique (sédentaires vs. actifs) a été pris en compte en tant que facteur inter-sujet (Questionnaire SAPD et VO₂MAX absolu L/min). Nous n'avons pas observé d'effets significatifs généraux ($ps > .35$) ou d'interaction impliquant l'âge, le niveau d'activité physique, l'ordre, et la tâche dans nos analyses ($ps > .20$). Ce facteur n'apparaît donc pas dans notre présentation des résultats.

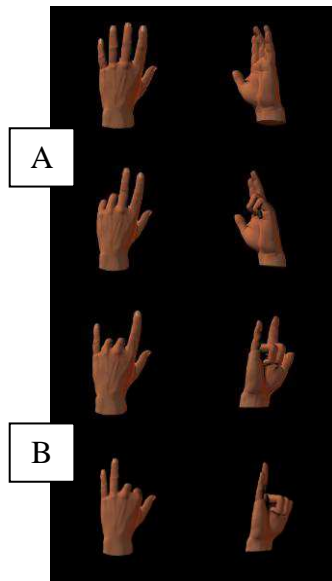
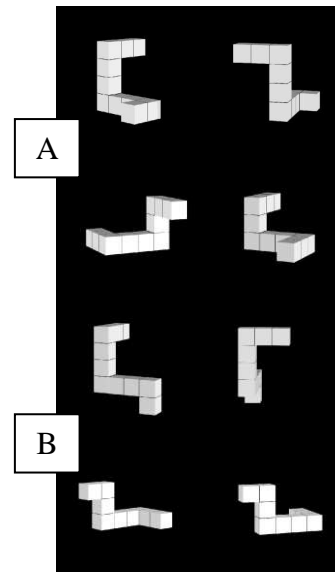
a) Rotation de mains (120°)b) Rotation d'objets (120°)

Figure 42. Illustration de a) paires de mains identiques/différentes et de b) paires d'objets identiques/différents. Le modèle est à gauche et le stimulus de comparaison est à droite, à 120° de disparité angulaire. La comparaison nécessite une rotation mentale pour superposer le stimulus de droite sur le modèle de gauche (ex. A). Quatre modèles différents ont été créés par type de tâche, ainsi que leurs répliques parfaites (ex. A), et leurs répliques inversées ou miroir (ex. B).

b) Groupes expérimentaux et procédure :

Les participants jeunes et âgés ont été divisés chacun en deux groupes indépendants (voir Tableau 13). Ils ont effectué les deux tâches de rotation mentale (session 1 et session 2) avec la tâche d'objets en session 1 (**Objets-Mains**) ou à la session 2 (**Mains-Objets**).

Tableau 13. Récapitulatif des groupes expérimentaux (N = 117 ; Etude 2)²⁴.

Groupes Jeunes ou Agés	Ordre	n (femmes ; hommes)	SESSION 1	SESSION 2
Jeunes	Mains-Objets	16 ; 12	72 paires de mains	72 paires d'objets
Jeunes	Objets-Mains	15 ; 18	72 paires d'objets	72 paires de mains
Agés	Mains-Objets	16 ; 14	72 paires de mains	72 paires d'objets
Agés	Objets-Mains	13 ; 13	72 paires d'objets	72 paires de mains

Chaque participant était assis sur une chaise, face à l'écran d'ordinateur. La distance yeux-écran était maintenue constante à environ soixante centimètres. Un boîtier de réponse e-prime était utilisé pour enregistrer la précision des réponses et leur durée (Figure

²⁴ Participants effectivement retenus dans l'analyse, selon critères, voir p. 142 (cf. Analyse des données).

43). Les consignes à suivre pour réaliser la tâche étaient présentées à l'écran et commentées par l'expérimentateur pour chacun des participants.

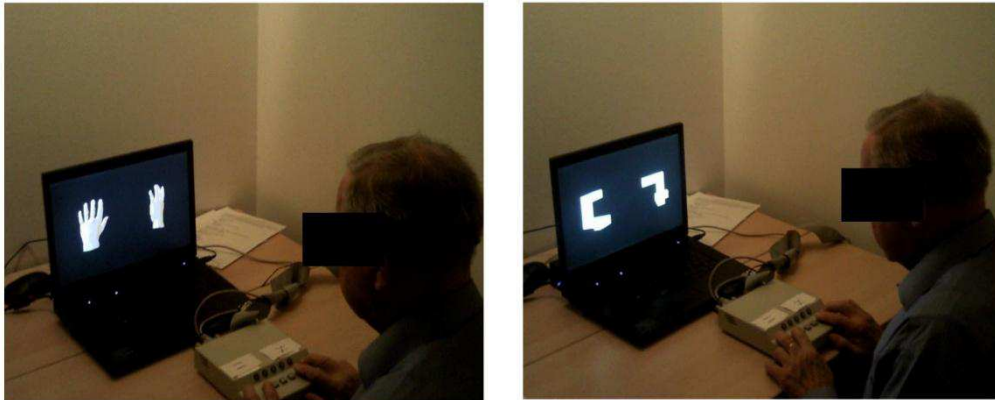


Figure 43. Illustration du dispositif lors de la phase expérimentale correspondant aux stimuli de "main" (photo de gauche) et "objet" (photo de droite). Les index du participant (mains gauche et droite) reposent sur les touches de réponses du clavier e-prime.

Chaque essai débutait par la présentation d'un écran blanc pendant 500 ms, suivi de la présentation d'une paire de stimulus qui restait présente à l'écran jusqu'à ce que les participants aient donné leur réponse. Ils devaient donner une réponse "identique" lorsque le stimulus de droite était similaire à celui de gauche, modulo la rotation appliquée. Ils devaient donner une réponse "différente", lorsque le stimulus de droite correspondait à l'image miroir de celui de gauche. Les réponses étaient données au moyen d'un boîtier de réponse dont l'une des touches correspondait à la réponse "identique", l'autre à la réponse "différente", les participants gardant les index des mains gauche et droite sur les touches correspondantes. L'ordre de présentation des touches de réponse était contrebalancé d'un participant à l'autre. Les participants étaient encouragés à donner une réponse correcte le plus rapidement possible. Dans la phase expérimentale, les stimuli "objets" et les stimuli "mains" étaient présentés en deux blocs séparés, l'ordre de présentation des blocs étant contrebalancé d'un participant à l'autre (objet-main vs. main-objet).

Avant que ne débute la phase expérimentale d'un bloc spécifique (main ou objet), chaque participant prenait part à une phase de familiarisation constituée de 12 paires de stimuli choisies aléatoirement parmi les paires constituées (main ou objet en fonction du bloc à réaliser). L'exactitude de leur réponse leur était alors communiquée pour chacun des 12 essais, de façon à s'assurer de la bonne compréhension des consignes (réponse "identique" versus réponse "différente"). En cas d'erreur, l'expérimentateur s'assurait de la

bonne compréhension des participants, tout en revenant sur l'explication des consignes, au besoin.

Après un rappel à l'écran des consignes de la tâche, la phase expérimentale proprement dite débutait. Qu'il s'agisse du bloc main ou du bloc objet, les 72 paires de stimulus élaborées (36 paires "identiques", 36 paires "différentes") étaient présentées dans un ordre aléatoire, une pause étant programmée tous les 12 essais. Cette pause se terminait à l'initiative des participants par un simple appui sur une touche faisant apparaître le premier des 12 essais suivants. Ces pauses n'ont pas excédé 15 secondes pour l'ensemble des participants et aucun d'entre eux n'a émis le souhait de quitter sa chaise pendant ce laps de temps. La participation durait environ 30 minutes.

c) Analyse des données :

Les analyses ont été menées sur les paires de stimuli identiques seulement²⁵. Seuls les temps correspondants à l'émission d'une réponse correcte ont été retenus pour les analyses (groupes jeunes : 97% à la tâche des mains et 89% à la tâche des objets ; groupes âgés : 87% à la tâche des mains et 77% à la tâche des objets). Quatre participants âgés ont obtenu des pourcentages de réponses inférieurs à 50% (chance) et ont été enlevés des analyses. Pour les paires de mains, 0.9% (jeunes) et 0.59% (âgés) des temps de réponse ont été considérés extrêmes (± 2.5 écart-types par disparité angulaire, analyse intra-participant). Pour les paires d'objets, 1.3% (jeunes) et 0.3% (âgés) des temps de réponse ont été considérés extrêmes (± 2.5 écart-types par disparité angulaire, analyse intra-participant). Les variables, aux différentes disparités angulaires (20° ; 40° ; 60° ; 80° ; 100° ; 120° ; 140° ; 160° ; 180°), ont été rassemblées en 3 regroupements de disparités angulaires (**faibles** : 20°-60° ; **moyennes** : 80°-120° ; **élevées** : 140°-180° ; cf. Amick et al., 2006, pour une procédure similaire).

Des ANOVAs ont été menées sur les pourcentages de réponses correctes et les temps de réponse, avec le Groupe (Jeunes vs. Agés) et l'Ordre (Mains-Objets : **M-O** vs. Objets-Mains : **O-M**) en tant que facteurs inter-sujets, et la Tâche (**Mains** vs. **Objets**) et les Disparités angulaires (**faibles**, **moyennes** et **élevées**) en tant que facteurs intra-sujets. Des ANOVAs ont aussi été menées sur l'intercept et la pente, avec le Groupe et l'Ordre comme facteurs inter-sujets, et la Tâche comme facteur intra-sujet. Les analyses ont été

²⁵ Les paires de stimuli différents ont servi à randomiser la présentation des paires de stimulus identiques. Elles ne nécessitent pas de rotation mentale dans la tâche de mains et dans la tâche d'objets.

menées sur les valeurs de pentes ascendantes (Mains : 20° à 120° ; Objets : 20° à 180°) ainsi que les indices intercepts correspondants. Nous rapportons des analyses corrélationnelles entre les deux tâches, selon l'âge et selon l'ordre. En général, les résultats significatifs à $p < .05$ sont rapportés, ainsi que des analyses post-hoc le cas échéant (Tests de Newman-Keuls avec termes d'erreurs inter ou intra correspondants, voir Winer, Brown, & Michels, 1991).

3.3.2. Résultats

Nous n'avons observé aucune corrélation (positive) significative entre les scores de précision et les temps de réponse, aux différents regroupements des disparités angulaires, pour les sessions 1 et 2, $r_s < 0.35$, $p_s > 0.07$ (sauf tendance : Groupe jeune M-O, Tâche mains, disparités 140°-180°, $r = .35$, $p = .07$). Ces résultats indiquent l'absence de compromis vitesse-précision.

a) Analyse des pourcentages de réponses correctes

L'ANOVA a été menée selon le plan d'analyse Groupe (âgés, jeunes) x Ordre (M-O, O-M) x Tâche (mains, objets) x Disparités angulaires (faibles, moyennes, élevées). L'analyse des pourcentages de réponses correctes montre un effet principal du Groupe, $F(1,113) = 34.25$, $\eta_p^2 = 0.23$, de la Tâche, $F(1,113) = 53.6$, $\eta_p^2 = 0.32$, et des Disparités angulaires, $F(2,226) = 53.6$, $\eta_p^2 = 0.32$, $p_s < .05$. Trois interactions significatives sont aussi observées : Tâche x Ordre, $F(1,113) = 7.73$, $\eta_p^2 = 0.064$, Tâche x Groupe x Ordre, $F(1,113) = 5.8$, $\eta_p^2 = 0.05$, et Tâche x Disparités angulaires, $F(2,226) = 46$, $\eta_p^2 = 0.29$, $p_s < .05$. La décomposition de l'interaction Tâche x Disparités angulaires montre que, pour la tâche mains, les réponses correctes sont significativement moins fréquentes aux disparités angulaires moyennes qu'aux disparités faibles, et élevées, $p_s < .05$ (Figure 44, p. 144). Pour la tâche objets, la fréquence de réponses correctes diminue significativement avec l'augmentation des disparités angulaires, les fréquences de réponses correctes aux disparités moyennes et élevées étant inférieures à toutes celles observées dans la tâche mains, $p_s < .05$.

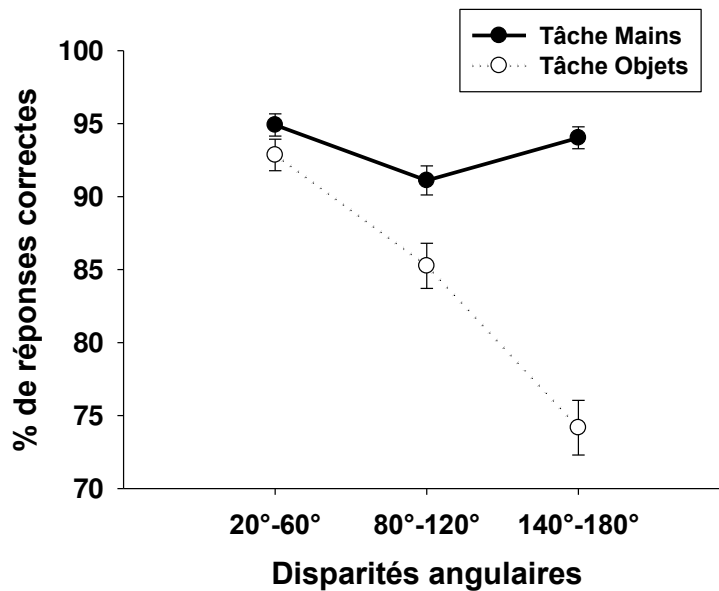


Figure 44. Pourcentages de réponses correctes (avec erreurs types) par Tâche (mains, objets) et Disparités angulaires (faibles : 20°-60°, moyennes : 80°-120°, élevées : 140°-180°).

Tel qu'illustré pour les deux tâches dans la Figure 45 (p. 145), la décomposition de l'interaction Tâche x Groupe x Ordre montre que les participants jeunes obtiennent de meilleurs résultats que les participants âgés aux tâches mains et objets lorsqu'elles sont réalisées en premier (**M-O** et **O-M**, respectivement ; $p < .05$), cette différence n'étant pas observée lorsque les tâches sont effectuées suite à une expérience préalable, lors de la deuxième session. Alors qu'aucun effet d'ordre n'apparaît chez les jeunes, le pourcentage de réussite de la tâche objets augmente chez les sujets âgés lorsqu'elle est réalisée après la tâche mains (**M-O** > **O-M**, $p < .05$), cet effet d'ordre n'affectant pas la réussite à la tâche mains ($p = .089$). Une analyse corrélacionnelle menée sur les pourcentages de réponses correctes entre les deux tâches, par groupe, par ordre, ne montre aucune corrélation significative, $r_s < .35$, $p_s > .05$.

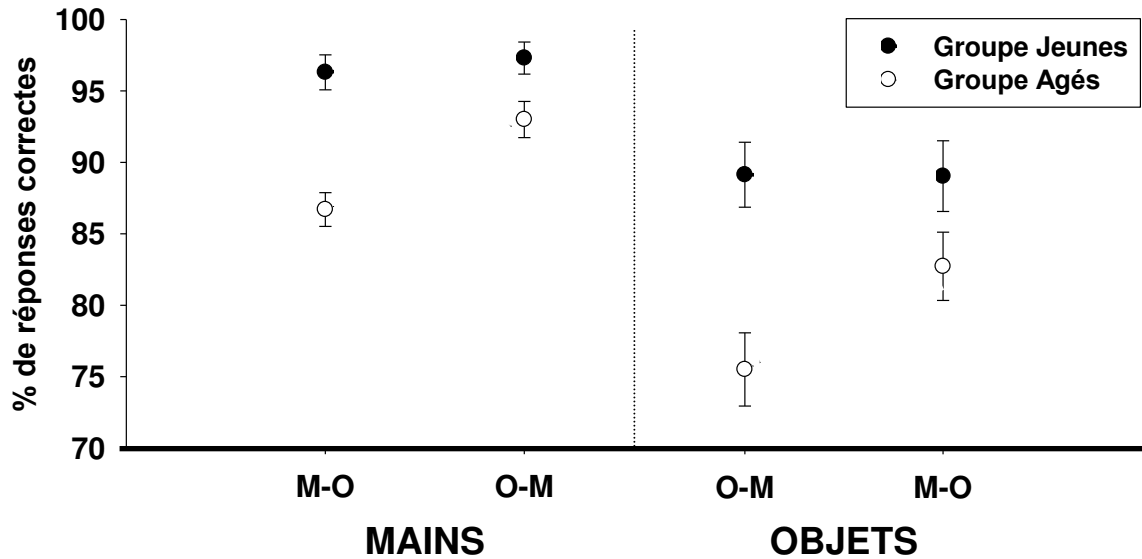


Figure 45. Pourcentages de réponses correctes (avec erreurs types) par Tâche (mains, objets), Groupe (âgés, jeunes) et Ordre (M-O, O-M).

b) Analyse des temps de réponse

L'ANOVA a été menée selon le plan d'analyse Groupe (âgés, jeunes) x Ordre (M-O, O-M) x Tâche (mains, objets) x Disparités angulaires (faibles, moyennes, élevées). L'analyse des temps de réponse montre un effet principal du Groupe, $F(1,113)=87.94$, $\eta_p^2=0.43$, de la Tâche, $F(1,113)=138.3$, $\eta_p^2=0.55$, et des Disparités angulaires, $F(2,226)=45.8$, $\eta_p^2=0.28$, $ps<.05$. Quatre interactions significatives sont aussi observées : Tâche x Groupe, $F(1,113)=20.3$, $\eta_p^2=0.15$, Disparités angulaires x Groupe, $F(2,226)=3.3$, $\eta_p^2=0.028$, Tâche x Disparités angulaires, $F(2,226)=37$, $\eta_p^2=0.25$, et Tâche x Disparités angulaires x Groupe, $F(2,226)=5.8$, $\eta_p^2=0.049$, $ps<.05$. La décomposition de l'interaction Tâche x Disparités angulaires x Groupe (Figure 46, p. 146) montre que, pour la tâche mains, les temps de réponses sont significativement plus longs aux disparités angulaires moyennes qu'aux disparités faibles et élevées pour les participants âgés uniquement, $ps<.05$, les temps de réponse des participants âgés étant toujours supérieurs à ceux des participants jeunes, $ps<.05$. Pour la tâche objets, les temps de réponses augmentent significativement avec l'augmentation des disparités angulaires : faibles < moyennes < élevées $ps<.05$ (sauf Jeunes : disparités moyennes=élevées, $p=.34$), les participants âgés obtenant des temps significativement plus longs que les participants jeunes, à toutes

disparités angulaires, $ps < .05$. En général, les temps de réponse à chacune des disparités angulaires sont plus longs dans la tâche objets que dans la tâche mains ($ps < .05$).

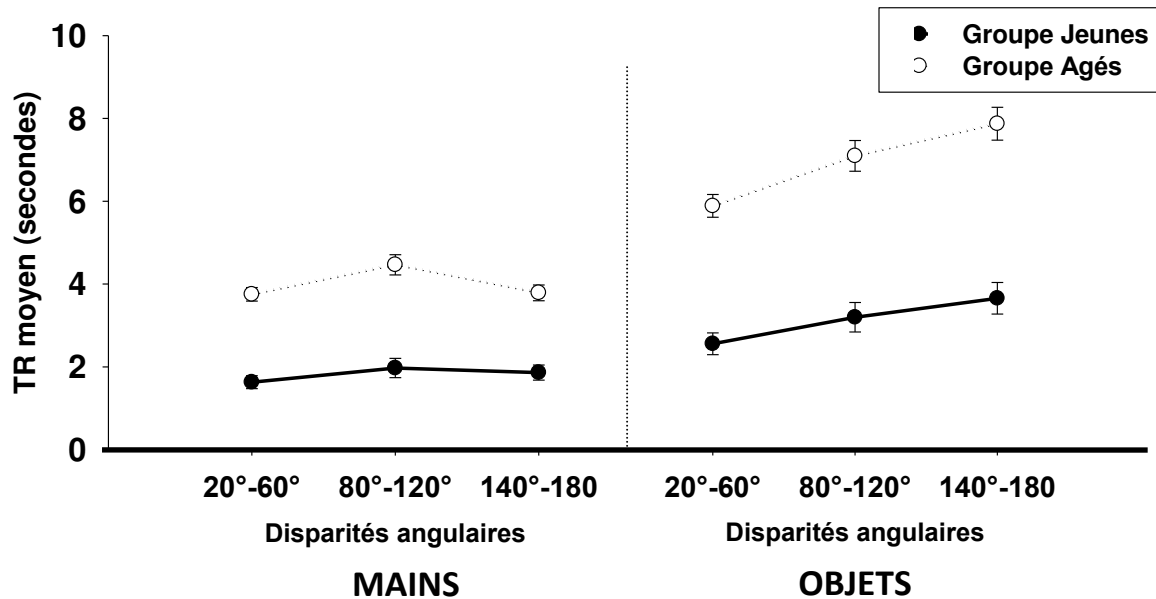


Figure 46. Temps de réponses (avec erreurs types) par Tâche (mains, objets), Disparités angulaires (faibles : 20°-60°, moyennes : 80°-120°, élevées : 140°-180°) et Groupe (âgés, jeunes).

Une analyse corrélacionnelle menée sur les temps de réponses entre les deux tâches, par groupe, par ordre, montre en général des corrélacions significatives, $rs > .55$, $ps < .05$. Cette analyse suggère que les participants plus rapides (lents) à la tâche visuelle sont aussi plus rapides (lents) à la tâche motrice, indépendamment de l'âge ou de l'ordre d'administration des tâches.

c) Analyse de l'intercept et de la pente

Les ANOVAs sur l'intercept et la pente ont été menées selon le plan d'analyse Groupe (âgés, jeunes) x Ordre (M-O, O-M) x Tâche (mains, objets). Les courbes des temps de réponse (cf. Analyse des temps de réponse) diffèrent entre la tâche mains et la tâche objets. Pour la tâche mains, nous avons observé une pente ascendante de 20° à 120°, suivie d'une baisse progressive des temps de réponse de 120° à 180°. Ainsi, pour le calcul de la pente et de l'intercept dans la tâche mains nous avons seulement pris en compte les temps de réponses aux angulations 20° à 120°. Pour la tâche objets, la pente ainsi que l'intercept

ont été calculés à partir des temps de réponse aux angulations 20° à 180°. Dans les deux tâches, seule la pente ascendante définit les processus de rotation mentale²⁶.

L'analyse des intercepts montre un effet principal du Groupe, $F(1,113)=82.8$, $\eta_p^2=0.42$, et de la Tâche, $F(1,113)=47$, $\eta_p^2=0.29$, ainsi qu'une interaction entre les facteurs Groupe et Tâche, $F(1,113)=8.5$, $\eta_p^2=0.07$, $ps<.05$. En général, les valeurs des intercepts sont plus élevées dans la tâche objets que dans la tâche mains ($p<.05$), ainsi que pour les participants âgés, comparativement aux participants jeunes ($ps<.05$) (Figure 47). Une analyse corrélacionnelle menée sur les intercepts entre les deux tâches, par groupe, par ordre, montre en général des corrélacions significatives, $rs>.38$, $ps<.05$.

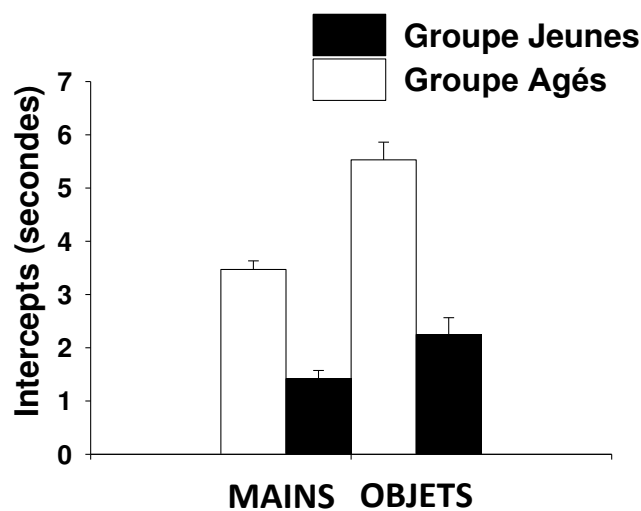


Figure 47. Valeurs d'intercepts (avec erreurs types) par Tâche (mains, objets) et par Groupe (âgés, jeunes).

L'analyse des pentes montre un effet principal du Groupe, $F(1,113)=7.6$, $\eta_p^2=0.06$, et de la Tâche, $F(1,113)=12.5$, $\eta_p^2=0.10$, ainsi que des interactions Tâche x Ordre, $F(1,113)=4.7$, $\eta_p^2=0.04$, et Tâche x Groupe x Ordre, $F(1,113)=8.87$, $\eta_p^2=0.07$, $ps<.05$. Tel qu'illustré pour les deux tâches dans la Figure 48 (p. 148), la décomposition de l'interaction Tâche x Groupe x Ordre montre que les participants jeunes et âgés obtiennent des pentes similaires aux tâches mains et objets lorsqu'elles sont réalisées en premier (**M-O** et **O-M**, respectivement ; $ps>.05$). Alors qu'aucun effet d'ordre n'apparaît chez les jeunes, la pente de la tâche objets est plus élevée chez les participants âgés lorsqu'elle est réalisée après la tâche mains (**M-O** > **O-M**), $p=.007$, cet effet d'ordre n'affectant pas

²⁶ Les positions de mains >120° (positions physiques inhabituelles) peuvent nécessiter une autre stratégie que la stratégie motrice (Parsons, 1987), la simulation interne d'une main en position inhabituelle étant impossible.

significativement la pente de la tâche mains pour les participants âgés effectuant la tâche mains après la tâche objets ($p=.25$).

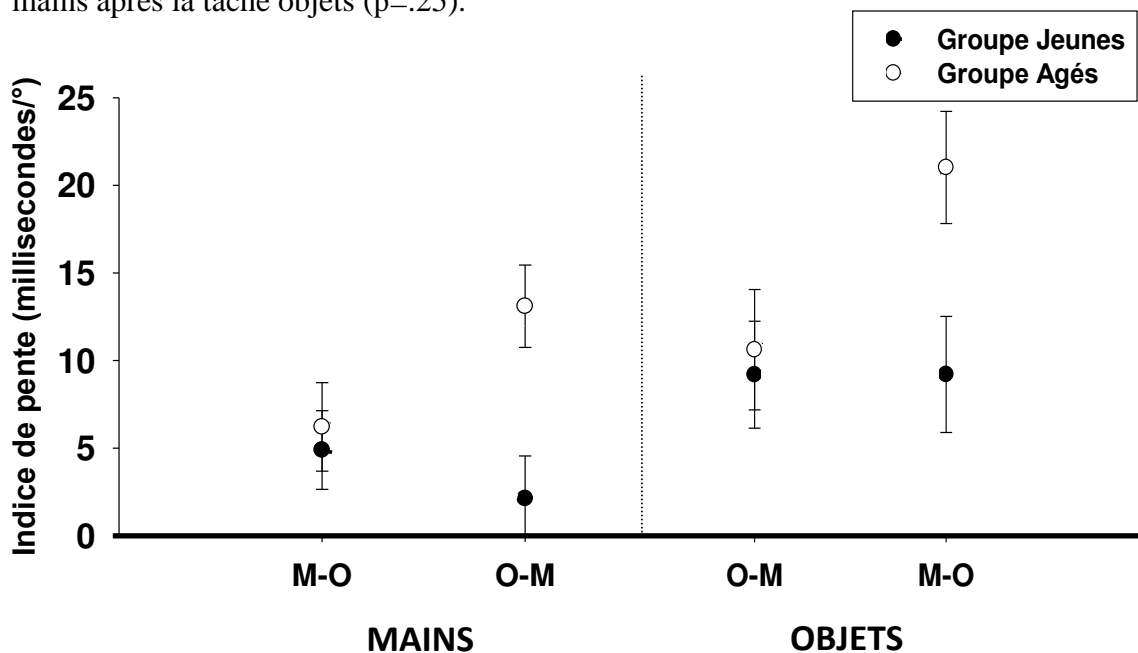


Figure 48. Valeurs de pentes (avec erreurs types) par Tâche (mains, objets), Groupe (âgés, jeunes), et Ordre (M-O, O-M).

Les participants âgés effectuant la tâche objets après la tâche mains obtiennent des valeurs de pentes plus importantes que tous les autres participants ($p < .02$). Rappelons que l'inclinaison de la pente décrit la vitesse de rotation mentale : plus la pente est importante, plus lente est la rotation mentale. Dans le cas des participants âgés M-O, l'expérience préalable de la tâche mains semble ainsi causer un ralentissement de la rotation mentale objets. Une analyse corrélacionnelle menée sur les pentes entre les deux tâches, par groupe, par ordre, montre des corrélacions significatives, $r_s > .43$, $p_s < .05$, seulement pour le groupe d'âgés O-M et le groupe de jeunes M-O (vs. Agés M-O et Jeunes O-M : $r_s < .13$, $p_s > .05$).

3.3.3. Discussion

Dans cette étude, notre objectif était d'évaluer l'effet de l'âge sur les capacités d'imagerie visuelle et motrice, ainsi que l'effet du contrebalancement de l'ordre des tâches d'imagerie mentale. Comme l'ont rapporté d'autres chercheurs (Dror, Schmitz-Williams, & Smith, 2005 ; Dror & Kosslyn, 1994 ; Saimpont et al., 2009), nous avons observé de moins fortes précisions chez les participants âgés dans les deux tâches, comparativement aux participants jeunes. Les participants âgés ont aussi mis plus de temps que les participants jeunes : pour répondre (temps de réponse) et pour le traitement lié à

l'encodage des stimuli (valeurs d'intercepts). En général, un avantage des participants jeunes a donc été démontré. Enfin, seuls les participants âgés ont été affectés par les conditions de changement des tâches d'imagerie mentale. Nos résultats appuient ainsi les hypothèses générales de départ, concernant l'avantage des jeunes et l'interaction statistique entre l'ordre de présentation des tâches et l'âge des participants. L'étude des effets d'ordre a donc permis d'évaluer la dépendance/indépendance des stratégies utilisées dans les deux tâches, mise en évidence seulement pour les participants âgés.

Un effet de l'ordre de présentation des tâches a été observé sur la précision des participants âgés. On notera suite à cette étude que la différence de précision liée à l'âge n'apparaît pas lorsque les tâches sont effectuées lors de la deuxième session. Du point de vue de cet effet, une expérience préalable de tâche différente contribue à améliorer la précision, ce qui réduit l'importance de l'avantage des jeunes (i.e., qualité des représentations). De plus, nous avons observé que les participants âgés, effectuant la tâche visuelle d'objets suite à la tâche de mains (M-O), réussissent mieux la tâche visuelle que les participants âgés de la condition inverse (O-M). Une expérience préalable d'imagerie motrice semble ainsi favoriser la construction des représentations visuelles, et non l'inverse ($p=.09$). Selon ces résultats, une représentation découlant de la tâche motrice est probablement réutilisée dans la tâche visuelle.

L'intérêt d'évaluer séparément l'effet de l'ordre sur les valeurs de pente a aussi été démontré. Lors de la première session, la vitesse de manipulation des représentations n'est pas affectée ni par l'âge, ni par la tâche. Toutefois, les participants âgés de la deuxième session mettent plus de temps (pente plus importante) pour effectuer une rotation mentale visuelle ($p<.05$), comparés aux autres participants. Chez les participants âgés, l'expérience préalable de tâche différente occasionne probablement un changement ou une modification des stratégies d'imagerie mentale.

Les participants âgés de la condition M-O seraient davantage affectés par l'expérience préalable. L'expérience motrice occasionne dans cette condition une augmentation significative de la précision, parallèlement à une augmentation significative du temps de rotation mentale. Pour les participants âgés de la condition O-M, nous observons aussi une tendance de transfert visuel sur la pente motrice. La stratégie motrice influence-t-elle la stratégie visuelle ? La stratégie visuelle influence-t-elle la stratégie motrice ? Si nous répondons « oui » à ces questions, nous proposons un prolongement de l'utilisation des stratégies dans le changement des tâches, donc une indépendance des stratégies vis-à-vis des tâches chez les participants âgés. D'autres études ont notamment

proposé l'indépendance des stratégies visuelles et motrices dans certaines conditions (motrice → visuelle : Amick et al., 2006 ; Kosslyn et al., 1998 ; Wraga et al., 2003 ; ou visuelle → motrice : Bode et al., 2007, Zacks et al., 2002 ; Toussaint & Meugnot, 2012).

Toutefois, comme nous l'avons déjà mentionné (cf. section 3.1., remarques préliminaires), dans notre étude il est difficile de définir la nature des transferts dans le changement des tâches, en raison de l'absence des groupes contrôles (Objets → Objets ou Mains → Mains). Une nouvelle étude devra ainsi intégrer des groupes contrôles pour mieux expliquer nos résultats. Par ailleurs, l'intégration des groupes contrôles permettrait d'émettre des prédictions conformément au paradigme des transferts. Ainsi, une équivalence entre les transferts des conditions avec changements de tâches (O-M et M-O) et les apprentissages des conditions sans changements de tâches (O-O et M-M) permettrait de suggérer une indépendance des stratégies utilisées dans les deux tâches. Selon nos résultats, nous ne pouvons toutefois pas attendre une telle équivalence chez des participants jeunes (aucun effet de l'ordre). Chez des participants âgés, selon nos résultats, l'équivalence demeurerait partielle en raison de l'asymétrie des transferts observés chez les groupes O-M et M-O.

Scénario des résultats dans une étude avec groupes contrôles : indépendance stratégique ?

Des études sur l'effet de la répétition des tâches de rotation mentale permettent de décrire les résultats attendus pour des groupes contrôles (O-O et M-M). Ces études démontrent généralement une amélioration de la précision et de la vitesse de rotation mentale suite à la répétition des tâches de rotation mentale visuelle (Albers & Höft, 2009 ; Berg, Hertzog, & Hunt, 1982 ; Heil et al., 1998 ; cf. Etude 1 : Expérience 1a et Expérience 2a) ainsi qu'une diminution des temps de réponse suite à la répétition de la tâche de rotation mentale motrice (Toussaint & Meugnot, 2012). La répétition des tâches de rotation mentale devrait généralement occasionner une augmentation de la vitesse de rotation mentale (Heil et al., 1998), indépendamment de l'âge (Berg et al., 1982) et de la tâche (Toussaint & Meugnot, 2012). Ainsi, l'amélioration en aptitudes spatiales est observée lorsque les mêmes stratégies et les mêmes processus de traitements sont sollicités dans des essais adjacents (Ackerman, 1989).

Nous pouvons proposer deux scénarios de résultats pour expliquer l'effet du changement des tâches sur la précision, par exemple, pour les participants âgés de la condition M-O de notre étude (Figures 49A et 49B, p. 151). Un prolongement ou la

réutilisation d'une représentation motrice dans la tâche visuelle serait mis en valeur par les résultats de la Figure 49A. Nous pouvons attendre dans ce scénario une augmentation de la précision pour le groupe contrôle O-O. L'augmentation équivalente de la précision visuelle pour le groupe M-O pourrait suggérer une influence similaire de la représentation motrice, ou l'utilisation d'une représentation motrice lors de la tâche visuelle. Découlant de ce patron, les participants âgés seraient capables de « jumeler » les représentations motrices aux représentations visuelles, en raison de l'expérience motrice préalable. Nous pourrions alors conclure à l'indépendance des représentations utilisées, les deux représentations pouvant être utilisées dans la tâche visuelle. Découlant aussi des résultats des transferts sur la pente pour le groupe M-O, l'interférence ou l'utilisation d'une stratégie motrice causerait une altération de la vitesse de rotation mentale visuelle, en plus de l'effet bénéfique sur la précision.

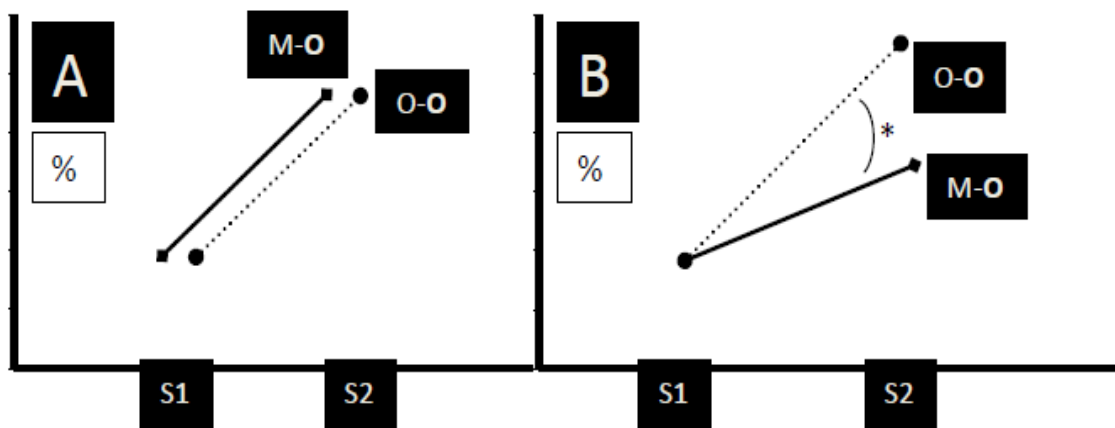


Figure 49. Prédiction des résultats sur les transferts de précision entre imagerie motrice et imagerie visuelle, pour une étude prévue ultérieurement avec des groupes contrôles O-O (et M-M).

La Figure 49B expose un autre scénario dans lequel la condition contrôle (O-O) occasionne un effet bénéfique de répétition, plus important que le transfert de précision de la condition de changement (M-O). L'influence d'une représentation motrice serait alors moins importante que l'influence découlant d'une représentation visuelle de même nature. L'effet bénéfique que nous rapportons dans notre étude serait alors partiel, le prolongement d'une représentation motrice en condition visuelle ne permettant pas d'atteindre une précision optimale lors de la deuxième session. Ce scénario favoriserait ainsi, pour nos résultats, l'explication d'une dépendance stratégique partielle dans la tâche visuelle.

Dans les deux scénarios, la raison du prolongement des stratégies ou des transferts reste encore à définir. Toutefois, si la difficulté rencontrée dans le changement est importante, alors les personnes âgées peuvent privilégier l'utilisation d'une stratégie déjà utilisée (Toussaint & Meugnot, 2012), ce qui doit néanmoins nécessiter une restructuration des stratégies (augmentation de la pente) et une synthèse des informations découlant de deux tâches différentes (augmentation de la précision). On peut alors se demander si l'implication de deux stratégies différentes est assez avantageuse, et si elle permet d'expliquer l'amélioration de la précision observée chez les participants âgés (i.e., dans la condition M-O).

Retour sur nos résultats : dépendance stratégique ?

La dépendance stratégique serait aussi plausible lorsque nous considérons nos résultats. Nous n'avons pas observé d'effet d'ordre chez les participants jeunes. Chez tous les participants, aucun effet de l'ordre n'a été observé sur les temps de réponse et les valeurs d'intercepts. Ces résultats peuvent aussi suggérer une spécificité des traitements dans les deux tâches. Dans une étude comportementale, l'impossibilité de réutiliser les informations découlant d'une expérience préalable serait compatible avec les études ayant démontré la spécificité des stratégies utilisées dans les deux tâches (Parsons et al., 1998 ; Sirigu et al., 2001 ; Tomasino et al., 2003).

Nous pouvons aussi considérer les patrons des réponses visuelles et motrices pour évaluer la question de la dépendance représentationnelle. Lors de la deuxième session, les patrons de réponse suggèrent l'utilisation d'une rotation mentale visuelle pour la tâche d'objets, puisque nous observons une augmentation des temps de réponse et une diminution des pourcentages de réponses correctes avec l'augmentation des disparités angulaires (Shepard & Metzler, 1971). Dans la tâche motrice, nous observons plutôt un effet des positions inhabituelles de mains aux disparités angulaires plus élevées ce qui est souvent associé à l'utilisation d'une rotation mentale motrice (Parsons, 1987, 1994, 2003).

Pour l'instant, nos résultats ne permettent pas de conclure à une indépendance des stratégies d'imagerie mentale et/ou à une synthèse des informations distinctes découlant des deux tâches, malgré les effets d'ordre observés pour les participants âgés. Les transferts implicites de stratégies, ayant déjà été observés dans des études neurophysiologiques (Kosslyn et al., 2001 ; Wraga et al., 2003), n'ont, de ce point de vue, pas ou très peu d'incidence sur les profils comportementaux.

– TROISIEME PARTIE –

**DISCUSSION GENERALE ET
PERSPECTIVES**

DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif principal de ce projet de recherche était d'évaluer la question des dépendances sensorielles et représentationnelles dans le cas de tâches de rotation mentale visuelle et tactile (Etude 1), et la question des dépendances représentationnelles, dans le cas de tâches de rotation mentale visuelle et motrice (Etude 2). Notre section expérimentale, articulée autour de six approches, était centrée sur deux paradigmes généraux : le paradigme de rotation mentale et le paradigme de transferts intermodaux (et inter-tâches). La discussion générale présentée ici sera divisée en trois sections. Dans les deux premières parties, nous reviendrons respectivement sur les résultats de la première étude et les résultats de la deuxième étude. Au début de chaque partie, certaines considérations seront émises concernant les points nouveaux de nos approches et, suite à un rappel des résultats, nous procéderons aux conclusions plus générales. Notamment, un modèle basé sur nos résultats de l'Etude 1, sera présenté à la fin de la première partie. La discussion s'achèvera par la présentation des perspectives de recherche.

Etude 1 : Etude des transferts intermodaux lors de tâches de rotation mentale. Spécificité tactile, indépendance sensorielle ou dépendance visuelle ?

Les deux premières expériences ont évalué les similarités/dissimilarités de traitement en rotation mentale en utilisant deux répliques tactiles de tâches visuelles, le Test des Rotations Mentales (MRT ; Vandenberg & Kuse, 1978 ; cf. Expérience 1) et une tâche de rotation mentale élémentaire (MR ; Shepard & Metzler, 1971 ; cf. Expérience 2). Au moins trois considérations nouvelles ont motivé l'utilisation de ces tâches.

Premièrement, peu d'information était disponible concernant les performances tactiles (Prather & Sathian, 2002 ; sauf Robert & Chevrier, 2003) alors qu'on retrouve de très nombreuses publications sur les modèles visuels de performance au MRT (i.e., Caissie et al., 2009 ; Geiser et al., 2006 ; Vigneau et al., sous presse ; Voyer & Hou, 2006, etc.) et à la MR (i.e., Shepard & Metzler, 1971 ; Cohen et al., 1996, etc.). Les informations découlant des recherches visuelles ont ainsi constitué une base sur laquelle comparer les deux modalités sensorielles, notamment lorsque l'on considère les modèles visuels des caractéristiques d'items du MRT et les données comportementales et neurophysiologiques du traitement visuel de la MR. Notamment, nous avons produit l'une des premières études psychométriques (sinon la seule) d'une réplique tactile d'un test visuel valide (Expérience 1b). Deuxièmement, ces tâches permettaient une comparaison du traitement visuel et

tactile sur des objets tridimensionnels non-familiers, difficilement catégorisables (i.e., verbal) et particulièrement adaptés pour évaluer les transferts intermodaux implicites d'aptitudes spatiales et de rotation mentale. La répétition de ces tâches occasionne généralement un apprentissage implicite en condition intramodale visuelle (Heil et al., 1998), par lequel nous pouvions évaluer l'importance des transferts intermodaux et de l'apprentissage intramodal tactile. Ainsi, différentes variables comportementales pouvaient être utilisées pour définir la nature des transferts intermodaux et des apprentissages intramodaux (i.e., précision, temps de réponse, intercepts, pentes, et stratégies cognitives). Troisièmement, dans les deux expériences, nous avons utilisé un plan expérimental intra-sujet dans lequel les participants réalisaient les tâches dans deux conditions successives, bénéficiant uniquement soit des informations visuelles, soit des informations tactiles. Selon nous, cette nouvelle méthode présentait l'avantage d'examiner les effets d'une expérience sensorielle spécifique sur la performance ultérieure en rotation mentale, la durée de traitement dans les deux modalités sensorielles permettant une construction/manipulation des représentations à la session 1, avant le changement de tâches à la session 2. Sauf pour une étude récente des appariements intermodaux en rotation mentale d'objets en deux dimensions surélevées, de Volcic et collaborateurs (2010), aucune étude n'avait encore évalué les transferts intermodaux en utilisant des tâches de rotation mentale.

Découlant des résultats de l'Étude 1, nous contribuons des nouveaux résultats concernant le paradigme de rotation mentale, le paradigme de transferts intermodaux, et le domaine plus général du traitement sensoriel et de l'intégration sensorielle, en psychologie cognitive. Dans l'étude 1, nous avons démontré des performances similaires visuelles et tactiles à des tâches de rotation mentale, pouvant néanmoins dépendre de traitements, de représentations et de stratégies cognitives spécifiques. De fait, le traitement par la modalité tactile nécessite plus de temps que le traitement par la modalité visuelle. Malgré cela, les facteurs de difficulté dans les deux tâches, basés sur les caractéristiques des stimuli, se sont démontrés particulièrement similaires entre les deux modalités sensorielles, suggérant des descriptions similaires d'objets dans les deux modalités sensorielles (Reales & Ballesteros, 1999). Un aspect intéressant des résultats tactiles de la première session est qu'ils démontrent une « mimique » des résultats visuels. Or, des performances similaires à des tâches d'aptitudes spatiales peuvent dépendre de représentations spécifiques, et pas nécessairement visuelles, pré-sémantiques visuelles ou multisensorielles. En empruntant l'exemple du débat entourant les théories quasi-picturales (Kosslyn, 1980 ; Kosslyn et al., 2006) et symboliques (Pylyshyn, 1981 ; 2003a), des résultats similaires ne confirment pas

l'utilisation de processus uniques de traitement, comme le décrivait le principal tenant de la position indéterministe John R. Anderson (repris par Kosslyn et al., 2006, p. 31) :

« Anderson (1978) proved mathematically that as long as behavioral data—such as response times—[during a mental rotation task]—were the only means of distinguishing the theories, propositional accounts can always be generated to mimic depictive accounts. This proof rests on the possibility of structure-process tradeoffs: when characteristics of the representation (the structure [or format]) differ from one theory to another, these differences can be compensated by changing the processes that operate on the representation. Anderson showed that such trade-offs can always allow one class of theories to mimic the other. »

Dans cet exemple, nous pouvons substituer, pour nos objectifs de discussion, les termes propositional et depictive, respectivement, par tactile et visual. Bon nombre de recherches ont montré des similarités entre résultats tactiles et visuels à des tâches de rotation mentale élémentaires (Dellantano & Spangnalo, 1990 ; Prather & Sathian, 2002) et notamment des aveugles peuvent obtenir des résultats similaires à ceux des voyants (Marmor & Zabach, 1976 ; Röder et al., 1997). Ainsi, l'utilisation d'une représentation visuelle n'est pas nécessaire. Les aveugles congénitaux et mêmes les voyants (Kozhevnikov et al., 2005) peuvent se référer à une représentation spatiale en rotation mentale.

Un aspect original de notre étude, et spécifiquement lorsque l'on considère l'Expérience 1b, était d'évaluer les similarités/dissimilarités du point de vue de la mesure dans une étude psychométrique du MRT. Nous avons ainsi montré que les difficultés et les temps de réponse dépendent des mêmes caractéristiques d'items du MRT dans les deux modalités sensorielles. De plus, les analyses psychométriques ont révélé des indices de fidélité et de validité similaires, les deux versions, visuelle et tactile, pouvant appartenir au même réseau nomologique de mesure en aptitudes spatiales (i.e., relation au Test des Figures Encadrées (EFT) : Witkin et al., 1971). Spécifiquement, les scores composites des items tactiles plus difficiles et les temps de réponse aux items tactiles plus faciles ont corrélé fortement avec les scores du critère externe d'aptitudes visuo-spatiales utilisé (EFT). Enfin, concernant le MRT, les pourcentages de réponses corrects tactiles et les temps de réponse tactiles se distribuent normalement, démontrant une bonne sensibilité de la mesure tactile en aptitudes spatiales. La modalité tactile, découlant de cette approche, a donc permis un traitement adéquat, précis, mais plus lent, au MRT (vs. Robert & Chevrier, 2003 ; vs. Millar & Al-Attar, 2004 ; vs. Millar & Al-Attar, 2005).

Les résultats de l'Expérience 2a sur la MR ont par ailleurs démontré une augmentation des temps de réponse et des erreurs avec l'augmentation de l'angulation,

similaire lorsque nous comparons les deux modalités sensorielles. La résolution des paires d'objets identiques pouvait ainsi nécessiter une rotation mentale dans les deux modalités sensorielles (Shepard & Metzler, 1971), sans que nous puissions évaluer la question de la similarité/dissimilarité des processus à la première session. L'Expérience 2b, sur les stratégies cognitives impliquées dans la prise d'informations spatiales, a par ailleurs démontré une distinction stratégique en fonction de la modalité sensorielle utilisée. Les participants en modalité visuelle accordent moins de temps en proportion au modèle et effectuent davantage de comparaisons entre objets présentés. Spécifiquement, cette distinction des stratégies cognitives pouvait dépendre de la limite de la mémoire de travail, dans la composante des informations visuo-spatiales, pour la modalité visuelle (Fitzhugh et al., 2008). La rotation mentale tactile serait plus lente, nécessitant moins de comparaisons entre objets, ce qui suggère des processus différents impliqués dans la construction des représentations visuelles et tactiles. Les participants peuvent ainsi effectuer une rotation mentale dans les deux modalités sensorielles, mais procèdent différemment dans la prise des informations (i.e., exemples de différences d'aptitudes démontrées par des différences qualitatives de traitement : Bethell-Fox et al., 1984 ; Vigneau et al., 2006).

Nous aurions pu nous contenter d'une comparaison inter-sujets, de la première session, dans nos deux premières expériences : la nouveauté des résultats étant déjà suffisamment démontrée. Toutefois, ces résultats, selon nous, ne renseignaient pas sur la question des dépendances sensorielles, ou des dépendances de processus en rotation mentale visuelle et tactile (Anderson, 1978 ; Kosslyn et al., 2006). La meilleure question devenait alors : si j'apprends dans une modalité sensorielle spécifique, le produit de mes apprentissages (i.e., perceptuels, contextuels) peut-il se généraliser dans le traitement d'une modalité différente, indépendamment du sens de transfert, de visuel à tactile ou de tactile à visuel ? La conclusion attendue, si nous répondions « OUI » à cette question, était que les deux modalités sensorielles nécessitent des processus cognitifs de traitement similaires dans les deux tâches de rotation mentale étudiées. La conclusion obtenue, puisque nous avons plus souvent répondu « NON » à cette question, est que les transferts intermodaux ne sont pas démontrés dans toutes conditions, lorsque nous considérons différentes variables de performance. Spécifiquement, les informations visuelles seraient mieux transférées dans le traitement tactile, que l'inverse (voir aussi Behrmann & Ewell, 2003 ; Hatwell, 2000a). Du moins, dans notre étude, sauf à quelques exceptions près, les transferts intermodaux, tactile vers visuel, ont le plus souvent été démontrés nuls, comparativement aux améliorations dans d'autres conditions : intermodale visuel-tactile et intramodales

visuel-visuel, tactile-tactile. En général, nous avons observé des patrons d'apprentissage intramodaux visuels et tactiles très similaires, ce qui ajoute à nos connaissances sur les fonctions d'apprentissage perceptuelles (Albers & Höft, 2009 ; Dinse et al., 2003 ; Dinse, Wilimzig, & Kalisch, 2008 ; Goldstone, 1998 ; Heil et al., 1998 ; Richard et al., 2004) et intersensorielles (Easton et al., 1997a ; Easton et al., 1997b ; Hatwell, 2000a ; Hatwell, 2000b ; Hatwell, 1994 ; James et al., 2002 ; Rose et al., 1998 ; Streri, 2000) en rotation mentale (Volcic et al., 2010).

Toutefois, d'autres études seraient nécessaires pour clarifier le rôle des différentes variables dans les différents apprentissages ou transferts. On ne peut pas conclure, vue l'asymétrie des conditions de transferts/apprentissages, que les mêmes processus sous-tendent les apprentissages dans les deux modalités sensorielles. L'utilisation des différentes variables décrites pour la rotation mentale, censées révéler des processus spécifiques (Dror & Kosslyn, 1994 ; Egan, 1978 ; Shepard & Metzler, 1971), est une chose. Une discussion de la nature des différents transferts/apprentissages, basés sur l'articulation de ces variables, est une autre chose, plus délicate pour l'interprétation. De plus, en procédant par l'analyse de l'hypothèse nulle — égalité entre transferts intermodaux et apprentissages intramodaux = processus de traitement similaires (Gibson, 1966) — nous pouvons courir le risque d'interprétations erronées (type a, type b ; Hatwell, 2000a) : accepter alors qu'il y a des différences (a), ou rejeter alors qu'il y a des similarités (b), n'étant toutefois pas révélées par nos variables d'apprentissage et de transfert. Suivant ces considérations, nous rapportons les résultats des transferts intermodaux dans quatre de nos approches 1a, 1c, et 2a/2b, avant de conclure cette première partie.

La première expérience s'articulait autour de deux approches des transferts pour l'étude du MRT (1a et 1c). Dans l'expérience 1a une analyse générale des transferts a suggéré une indépendance sensorielle des représentations mentales (précision), via des traitements différenciés visuels et tactiles (temps de réponse) (Toussaint, Caissie, et al., 2012). Toutefois, les transferts ne se sont pas montrés significatifs dans la condition intermodale avec expérience préalable tactile. Nos analyses corrélationnelles ont par ailleurs démontré qu'un facteur individuel pouvait affecter la précision dans les deux modalités sensorielles. Ce facteur de stabilité dans le changement des modalités sensorielles reste à définir.

L'expérience 1c était motivée par des corrélations significatives obtenues entre les précisions d'items tactiles plus difficiles et le critère externe d'aptitudes visuo-spatiales (Expérience 1b : EFT). Nous pensons que des transferts seraient plus importants pour les

items difficiles, dans les deux conditions intermodales. Nous avons néanmoins confirmé l'impossibilité, en général, d'accueillir des idées tactiles, découlant d'une expérience préalable tactile, dans le traitement visuel. Les transferts tactiles n'ont pas été démontrés significatifs pour aucune des variables à l'étude (précision et temps de réponse), pour aucune des caractéristiques d'items. En revanche, nous avons montré des transferts visuels dans le traitement tactile pour les items plus difficiles (précision et temps de réponse), pouvant nécessiter un encodage et une représentation des formes globales des objets (i.e., occlus-homogène). En plus de suggérer que les facteurs sous-tendant les apprentissages intramodaux ne sont pas nécessairement les mêmes, entre les deux modalités sensorielles, ces résultats ont démontré que la résolution des différents items du MRT ne dépend pas nécessairement d'une représentation visuelle ou de processus de traitement visuels lors de la première session. Ainsi, la dépendance visuelle n'a pas été démontrée pour les aptitudes spatiales (vs. Millar & Al-Attar, 2004). Un problème de l'approche des transferts utilisant le MRT est que nous ne pouvons pas, par l'étude des variables de précision et des temps de réponse seulement, distinguer les processus de traitement relatifs aux valeurs de pentes et aux valeurs d'intercepts. Or, cette distinction était nécessaire pour développer une définition plus précise des aspects du traitement visuel pouvant être transférés en rotation mentale tactile. Pour évaluer précisément les transferts intermodaux et les apprentissages intramodaux de rotation mentale, nous avons développé une différente approche, telle qu'exposée dans l'Expérience 2, en utilisant la tâche de RM (Shepard & Metzler, 1971).

Dans l'Expérience 2, rappelons que les résultats de la première session ont confirmé l'utilisation d'une rotation mentale (2a) et de stratégies cognitives différentes (2b) lorsque nous comparons les deux modalités sensorielles. L'intérêt d'utiliser la tâche RM, pour l'analyse des transferts, était d'analyser séparément, en plus de la précision et des temps de réponse, les valeurs relatives à la pente (i.e., processus liés à la manipulation mentale de l'information ou à la rotation mentale) et à l'intercept (i.e., processus liés à l'encodage, la prise de décision, et l'émission de la réponse). L'analyse des transferts a en général, comme dans le cas de l'Expérience 1, démontré l'impossibilité de transferts tactiles pour la rotation mentale visuelle (i.e., temps de réponse, pente, intercept), démontrant néanmoins un transfert de précision (Expérience 2a). Parallèlement, nous avons démontré qu'une expérience tactile permet de réutiliser des stratégies cognitives tactiles durant la prise des informations visuelles (Expérience 2b). Nous avons suggéré que le transfert de précision tactile est davantage lié à une influence des stratégies tactiles sur les patrons de mouvements oculaires visuels (i.e., NFHs : plus d'inspection visuel du haut

des objets suite à une expérience tactile + NCs : moins de comparaisons visuelles entre objets suite à une expérience tactile = meilleure précision visuelle). En revanche, une expérience préalable visuelle a occasionnée des temps de traitement tactiles plus rapides (i.e., temps de réponse, intercept ; tendance : pente), sans toutefois améliorer la précision tactile. Les résultats des transferts dans cette direction suggèrent par ailleurs qu'une expérience préalable visuelle n'est pas avantageuse pour le traitement tactile. L'influence plus marquée d'une représentation visuelle peut alors créer un conflit sensoriel ou une interférence contextuelle dans le traitement (i.e., Miller, 1972 ; Rock & Victor, 1964 ; Hershberger & Misceo, 1996). En somme, ces résultats ont démontré un avantage des apprentissages dans les conditions intramodales et certains des transferts dans la condition intermodale visuelle-tactile, comparativement à la condition de transferts tactile-visuel. Les asymétries de transferts et d'apprentissages ont encore suggéré une spécificité visuelle et tactile des apprentissages intramodaux. Nous avons conclu que les transferts intermodaux pouvaient découler d'influences sur le temps imparti aux différents processus de traitement et sur les stratégies cognitives de la prise d'informations, et pas nécessairement sur les représentations ou la manipulation des représentations en rotation mentale.

Conclusion générale de l'Etude 1

Nous pouvons conclure que l'asymétrie des transferts intermodaux confirme la spécificité du traitement tactile et la spécificité du traitement visuel en rotation mentale, au moins lors d'une première session, et ce, malgré des résultats similaires obtenus suite au traitement dans les deux modalités sensorielles. Nos résultats démontrent que les aptitudes spatiales (MRT) et l'utilisation d'une rotation mentale (MR) ne dépendent pas d'un traitement visuel : les aptitudes spatiales et la rotation mentale tactiles peuvent dépendre d'une représentation spécifique et d'une manipulation spécifique des représentations mentales. Ces différences « fragilisent » les transferts intermodaux, et spécialement lorsqu'une expérience préalable tactile est suivie du traitement visuel. Le traitement tactile occasionne néanmoins une meilleure précision visuelle, liée à une influence stratégique. Nous avons aussi observé des transferts visuel-tactile similaires lorsque comparés aux apprentissages intramodaux. Par contre, le transfert visuel ne serait pas nécessairement avantageux pour la précision tactile. Les apprentissages intramodaux, bien qu'équivalents, peuvent ainsi dépendre de facteurs différents.

Modèle explicatif basé sur différents modes des traitements et des représentations

Dans cette section, nous proposons un modèle explicatif des performances intramodales et intermodales basé sur notre compréhension des modes de traitements visuels et tactiles des formes d'objets, déjà décrits dans la littérature (i.e., Lakotos & Marks, 1999 ; Klatzky & Lederman, 2006 ; Lederman & Klatzky, 1987 ; Lederman & Klatzky, 1990 ; Millar & Al-Attar, 2005). Nous nous en tiendrons pour l'instant à la simple distinction entre processus de traitements globaux/rapides vs. processus de traitement locaux/séquentiels-lents (Lakotos & Marks, 1999 ; Lederman & Klatzky, 1987) rattachés respectivement à la modalité visuelle et à la modalité tactile. Nous nous intéresserons à comment ces modes de traitements spécifiques peuvent contribuer à une manipulation mentale, en rotation mentale, de représentations différentes, pour les objets que nous avons utilisés (Cubes S-M de Shepard & Metzler, 1971), et comment suite à une expérience préalable certains appariements intermodaux visuel-tactile sont possibles alors que d'autres, tactile-visuel, sont plus fragilisés, voire impossibles.

Le système visuel permet un traitement des propriétés d'objets (formes) et des propriétés spatiales (relations spatiales entre segments d'objets) par des systèmes distincts (voie ventrale : objet vs. voie dorsale : spatial ; Goodale & Milner, 1992 ; Schneider, 1969 ; Ungerleider & Mishkin, 1982). Des études neurophysiologiques et comportementales ont aussi démontré que l'imagerie mentale respecte cette dissociation (visual object imagery vs. visual spatial imagery ; Farah, 1988 ; Farah et al., 1988 ; Kozhevnikov et al., 2005). De même, le système tactile serait organisé selon une dissociation des traitements des informations spatiales et matérielles (i.e., spatial vs. material ; Gentaz & Badan, 2000 ; Reed et al., 2004 ; Reed et al., 2005 ; James et al., 2007) sans que nous n'ayons d'informations décrivant une dissociation des mécanismes d'imagerie mentale tactile (sauf voir dissociation neuronale entre traitements d'éléments microscopiques et macroscopiques, Stoesz et al., 2003). Certains modèles en vigueur suggèrent plutôt qu'un traitement visuel est impliqué dans les représentations de formes au toucher (Amedi et al., 2001 ; Amedi et al., 2002 ; Lacey & Sathian, 2008), et pour la rotation mentale tactile d'objets simples (Röder et al., 1997 ; Rösler et al., 1993 ; Sathian et al., 1997), chez des participants voyants.

En théorie (« mixtures of experts architecture », Pascual-Leone & Hamilton, 2001), les différentes parties du cerveau « compétitionnent » entre elles lors des tâches, le système le plus approprié étant le plus sollicité. Ceci peut expliquer l'avantage de la vue pour les

aptitudes spatiales (Millar & Al-Attar, 2005), et pourquoi les informations visuelles sont mieux intégrées dans les conditions de transferts visuel-tactile (cf. Etude 1), et particulièrement en cas de difficulté tactile (cf. Expérience 1c : MRT). Dans une première session, le traitement tactile serait spécifique puisqu'il est contraint à dépendre d'un traitement tactile spatial sur les segments locaux, pour la formation de représentations spatiales (specific tactile spatial coordinates imagery), dans un système de références spécifiques (Volcic et al., 2010). Lorsque l'information visuelle devient disponible en mémoire, par contre, le traitement tactile bénéficie d'une représentation visuelle de la forme globale (visual object imagery + specific tactile spatial coordinates imagery). Dans la combinaison mentale ou la synthèse mentale des deux expériences sensorielles (passé-visuel et présent-tactile), les participants tendent à augmenter leur vitesse de traitement tactile, tout en privilégiant l'utilisation de la représentation visuelle (cf. Expérience 2a). Toutefois, nous avons observé que cette « double dépendance » n'est pas nécessairement avantageuse pour la précision dans une tâche de RM tactile. La modalité visuelle de son côté serait plus portée sur des mécanismes de traitement de formes globales d'objets (visual shape perception et visual object imagery), appropriés pour la rotation mentale visuelle (Kosslyn et al., 2006). L'information découlant d'une expérience de traitement spatial tactile serait alors dominée par l'information disponible (présent-visuel) dans les conditions de transferts tactile-visuel. Nous avons toutefois démontré qu'une influence stratégique tactile, plus subtile, permet l'utilisation d'une stratégie cognitive d'inspection segmentée spatiale-visuelle (Expérience 2b, transfert NFHs ; visual object imagery + spatial coordinates imagery). Les différences d'intégration de stratégies (spatiale vs. objet ; séquentielle vs. globale) expliqueraient ainsi pourquoi une expérience tactile contrainte-spatiale n'ajoute pas d'informations importantes dans le cadre du traitement visuel, les améliorations en conditions intramodales pouvant aussi être spécifiques à la modalité utilisée. Nous présentons un schéma de notre modèle à la Figure 50 (p. 162), exposant les 4 conditions évaluées dans cette thèse. Si l'utilisation d'une stratégie spatiale est la plus sollicitée dans le cas du traitement tactile, et l'utilisation d'une stratégie visuelle dans le traitement visuel, notre travail démontre alors que ces deux stratégies distinctes sont appropriées pour la rotation mentale, comme l'ont démontré Kozhevnikov et collaborateurs (2005), pour des tâches d'imagerie mentale visuelles.

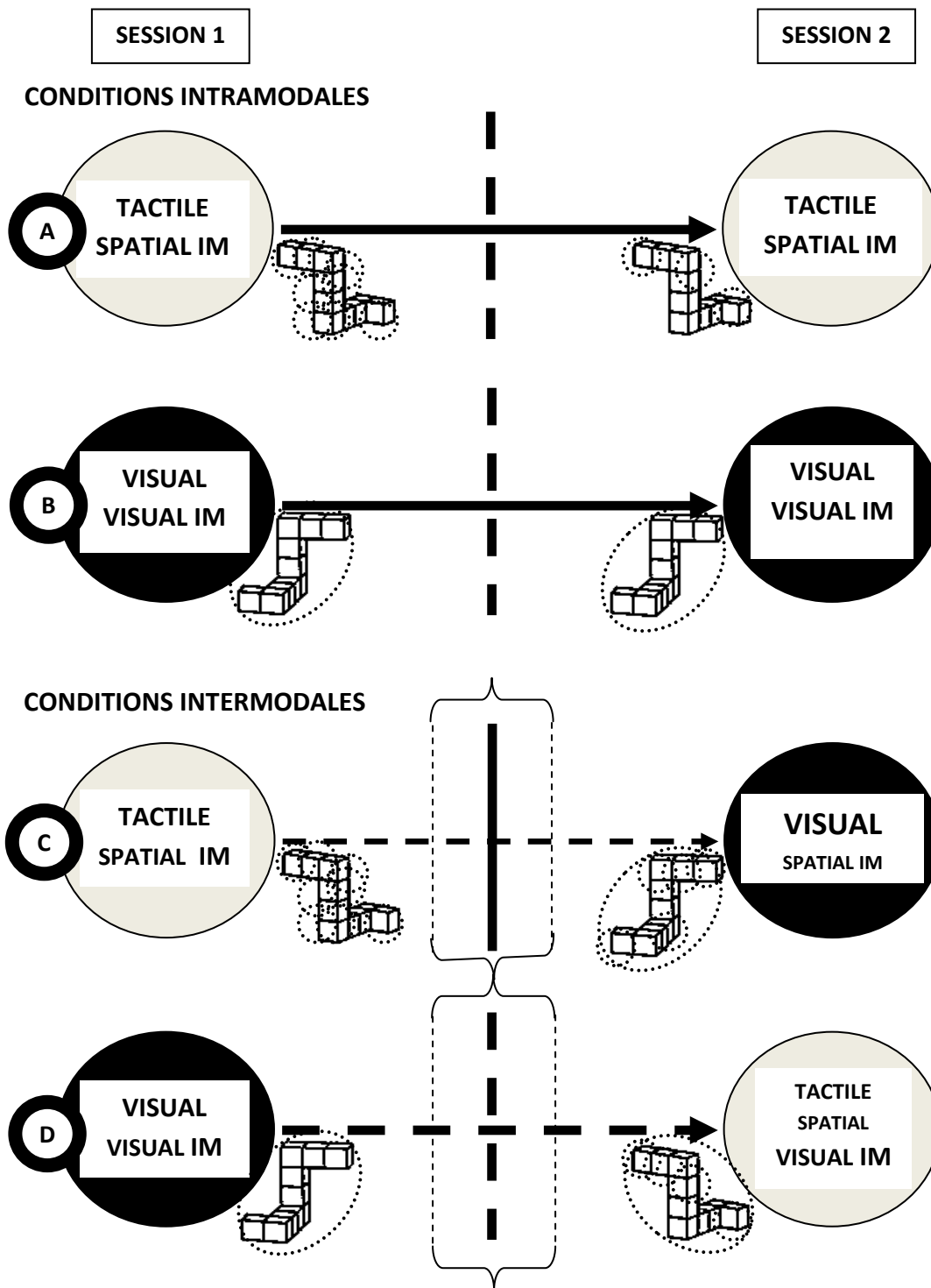


Figure 50. Illustration d'un modèle explicatif des performances intramodales et intermodales en rotation mentale avec objets tridimensionnels S-M (Shepard & Metzler, 1971). IM = imagerie mentale. Conditions intramodales : Session 1 : stratégies spécifiques Tactile-spatiale-IM ou Visuelle-visuelle-IM. Session 2 : stratégies spécifiques Tactile-spatiale-IM ou Visuelle-visuelle-IM. Conditions intermodales : Session 1 : stratégies spécifiques Tactile-spatiale-IM ou Visuelle-visuelle-IM. Session 2 : stratégies interférentes Tactile-spatiale-Visuelle-IM ou Visuelle-spatiale-IM. L'influence tactile sur le traitement visuel est limitée. Le transfert dans ce sens est plutôt fragilisé. L'influence visuelle sur le traitement tactile est importante, pouvant néanmoins interférer avec le traitement tactile dans le transfert. Les transferts intramodaux sont importants, pouvant néanmoins dépendre de stratégies spécifiques à la modalité sensorielle utilisée.

Comparaison avec d'autres modèles tactiles : imagerie visuelle et indépendances

Trois modèles généraux proposent l'utilisation des informations visuelles et/ou multisensorielles dans le traitement tactile. Une première explication intuitive découle de l'observation de l'implication du cortex visuel dans des tâches non-visuelles tactiles. Sathian et collaborateurs (1997) ont ainsi suggéré que le traitement tactile d'objets implique une visualisation et/ou l'imagerie mentale visuelle. Freides (1974) avait déjà émis cette hypothèse. Selon lui (décrit dans Lacey & Sathian, 2008, p. 254) :

« Such visualization may be a specific instance of a more general strategy for processing complex tasks, in which the most suitable sensory modality is pressed into action. »

Ce premier modèle rejoint l'explication du traitement dans des zones « métamodales » du cerveau, découlant d'une compétition constante entre zones de traitement inadaptées et adaptées pour les aptitudes spatiales, telle que l'ont décrit Pascual-Leone et Hamilton (2001 ; « mixtures of experts architecture »). Un deuxième modèle explicatif, selon Sathian (2005), suggère que les traitements visuel et tactile produisent une représentation unique, multisensorielle. Elle serait activée, retenue et récupérée, indépendamment de la modalité sensorielle utilisée, ou indépendamment de l'expérience préalable, tout en conservant les propriétés spécifiques découlant du traitement dans les deux modalités sensorielles (« modality tags »). D'autres travaux suggèrent qu'une représentation multisensorielle serait encodée dans un format spatial indépendant. Ainsi, l'imagerie spatiale serait utilisée dans les deux modalités sensorielles, pour le développement de représentations sous forme de descriptions structurales similaires (tactile et visuel : Lacey & Sathian, 2008 ; Lacey, Peters, & Sathian, 2007 ; visuel : Blajenkova, Kozhevnikov, & Motes, 2006 ; Blajenkova & Kozhevnikov, 2009 ; Kozhevnikov et al., 2005 ; Kozhevnikov, Hegarty, & Mayer, 2002). Ces modèles prédisent des transferts intermodaux d'égale importance, et des apprentissages intramodaux visuel et tactile de même nature dans des tâches spatiales.

Notre modèle propose plutôt une explication de formats spécifiques des représentations, découlant d'une non-équivalence des transferts d'informations entre les conditions de notre étude. Notre étude suggère que la rotation mentale visuelle dépend d'une représentation globale visuelle, pour le traitement d'objets tridimensionnels complexes (Sathian & Prather, 2002). La rotation mentale tactile, sans expérience

préalable, dépend d'une représentation spatiale tactile des segments d'objets et des relations entre segments d'objets, spécifique au traitement tactile d'objets tridimensionnels complexes.

Les modèles basés sur des représentations visuelles et/ou multisensorielles ne peuvent donc pas expliquer nos résultats. Si le toucher permet de connaître (Hatwell, 2000a) et d'apprendre (Dinse et al., 2003 ; Dinse et al., 2008 ; Richard et al., 2004), il peut aussi contribuer une construction de représentations distinctes, tout en alimentant une conscience unique de l'environnement proximal et des objets. Les mains (i.e., main droite) sont des organes moteurs par lesquelles sont réalisées des opérations de saisie, de maintien, de transport et de transformation physique des objets (Hatwell, 2000a). Plus que dans la vue, la perception et l'action sont indissociables dans la modalité tactile. On voit par ailleurs que les résultats similaires entre la vue et le toucher donnent lieu à des appréciations diverses (i.e., dépendances visuelles). Or, les différences entre la vue et le toucher doivent être pris en compte. Le toucher est impliqué dans toute une panoplie d'activités humaines, pouvant tout autant préserver une spécificité de traitement, sans son « concurrent plus rapide » visuel, et notamment lors du traitement d'informations spatiales en rotation mentale.

Etude 2 : L'effet du changement de tâches de rotation mentale en fonction de l'âge : la résolution d'une tâche d'imagerie visuelle et d'imagerie motrice dépend elle de représentations et de stratégies spécifiques ?

Cette étude a évalué les similarités/dissimilarités représentationnelles pour des tâches de rotation mentale visuelle (MR ; Shepard & Metzler, 1971) et motrice (Kosslyn et al., 2001 ; Kosslyn et al., 1998 ; Parsons, 1987, 2003 ; Wraga et al., 2003). Au moins deux considérations nouvelles ont motivé cette étude.

Premièrement, nous n'avons pas trouvé d'exemples d'études comportementales évaluant les transferts dans les deux sens : « motrice-visuelle » et « visuelle-motrice ». Dans l'optique d'étudier la question de la spécificité des stratégies d'imagerie mentale, il nous semblait approprié d'évaluer l'effet du contrebalancement de l'ordre d'administration des tâches sur les transferts possibles d'une tâche à l'autre, dans un plan expérimental intra-sujets. Découlant de notre première étude (cf. Etude 1), nous pouvions ainsi procéder à une étude dans laquelle les stimuli présentés étaient visuels, les différences entre tâches pouvant alors découler de l'utilisation de stratégies mentales spécifiques, et non perceptuelles ou sensorielles. Nous pouvions ainsi évaluer le bienfait d'utiliser cette

méthode pour évaluer, plus spécifiquement, la question des dépendances représentationnelles en rotation mentale. Deuxièmement, une comparaison des conditions intermodales, en rajoutant le facteur inter-sujet relatif à l'âge, constituait une nouvelle contribution de recherche sur le vieillissement normal.

Deux prédictions sur les tâches ont été étudiées. En général, découlant d'études cliniques ayant démontré une dissociation des stratégies motrices et visuelles (Sirigu & Duhamel, 2001 ; Sirigu et al., 1996), nous n'attendions pas de transferts ou d'améliorations dans le changement des tâches. En revanche, nous avons aussi considéré d'autres études ayant suggéré l'implication d'une stratégie motrice dans le traitement d'une tâche visuelle (Kawamichi et al., 2007 ; Kosslyn et al., 2001 ; Wraga et al., 2003) ou l'implication d'une stratégie visuelle dans une tâche motrice (Bode et al., 2007 ; Richter et al., 1997 ; Tagaris et al., 1997 ; Zacks et al., 2002). Ces dernières études pouvaient suggérer une influence entre stratégies spécifiques, telle que démontrée par différentes variables de transfert. Notamment, aucune étude comportementale n'avait encore évalué séparément les transferts sur les valeurs de pentes et sur les valeurs d'intercepts.

Concernant l'âge des participants, nous attendions de meilleures performances chez les jeunes, pour toutes variables étudiées (i.e., précision et vitesse : temps de réponse, valeur d'intercept et valeur de pente) aux tâches d'imagerie visuelle et motrice (Band & Kok, 2000 ; Dirkx & Craik, 1992 ; Dror & Kosslyn, 1994 ; Saimpont et al., 2009 ; Skoura et al., 2005), en raison d'un déclin cognitif plutôt général chez les personnes âgées (Hoyer & Verhaeghen, 2006 ; Newell et al., 2006). Toutefois, d'autres études permettaient de prédire un déclin plus important de l'imagerie motrice chez les personnes âgées, comparativement aux jeunes (Mulder et al., 2007), due à une perte des représentations sensorimotrices et à un mode de vie plus sédentaire des personnes âgées (nous avons pris le niveau d'activité physique en compte dans nos analyses initiales).

Concernant l'effet du changement des tâches, nous pensions ainsi observer des effets plus marqués chez les personnes âgées sédentaires, par une tendance à changer de stratégies en cas de difficulté (Toussaint & Meugnot, 2012), et à présenter davantage de difficultés d'adaptation dans le changement (Ridderinkhof et al., 2002). Une interférence cognitive avait déjà été observée pour ce groupe d'âge (De Jong et al., 1999 ; Kramer et al., 1999 ; West & Craik, 1999), en raison notamment d'une difficulté à négliger les informations découlant d'une expérience préalable (Hasher & Zacks, 1988 ; Kramer et al., 1994 ; Ridderinkhof & Van der Molen, 1997).

Nos résultats ont confirmé une spécificité des stratégies utilisées dans les deux tâches, chez les jeunes. Les patrons de résultats caractérisant les deux types d'imagerie mentale, n'ont pas changé (ou presque pas) en fonction de l'ordre de présentation des tâches. Nous avons seulement observé un effet du changement des tâches chez les personnes âgées. Chez ce groupe d'âge nous avons observé une perturbation significative de la vitesse de rotation mentale visuelle (interférence contextuelle) seulement lorsqu'une tâche motrice précède la tâche visuelle (augmentation de la précision). Selon ces résultats, les participants âgés réutilisent probablement des informations découlant de l'expérience préalable motrice. Sans expérience préalable, nous avons observé des pentes équivalentes entre les deux tâches et les deux groupes d'âge. Ce résultat démontre le maintien de la manipulation d'images mentales chez les personnes âgées, pour un déclin plus prononcé du traitement d'encodage, et ce indépendamment du niveau d'activités physiques.

Les résultats de cette étude démontrent qu'un plan expérimental intra-sujet, faisant varier l'ordre des tâches, peut être approprié pour évaluer les similarités/dissimilarités entre tâches de rotation mentale, dans un paradigme d'apprentissage ou de transfert. Nous avons aussi étudié les différences générales liées à l'âge. Si les études neurophysiologiques ont démontré une influence implicite des stratégies étant liée « à ce que les participants font au préalable » (Wraga et al., 2003), nous n'avons pas confirmé ou infirmé ces résultats dans notre étude. Nos résultats confirment seulement que l'influence préalable n'a pas de conséquence importante sur des relevés comportementaux. Cette distinction entre résultats comportementaux et neurophysiologiques est importante à considérer dans le cadre des recherches comportementales voulant évaluer les transferts entre tâches, ou même entre différentes modalités sensorielles.

Dans des études comportementales, si les stratégies s'influencent de façon significative, selon notre approche, nous attendons des changements comportementaux. Ces changements peuvent suggérer que les participants s'imaginent, suite à une tâche motrice, « manipuler les objets d'une tâche de rotation mentale visuelle avec leurs mains », ou qu'ils « préparent » une action motrice sur les objets (Wraga et al., 2003). Si les techniques d'imagerie cérébrale suggèrent un transfert implicite des stratégies, ce résultat ne devrait-il pas avoir une conséquence comportementale directe, observable dans nos résultats ? Si nous répondons « OUI » à cette question, nous nous engageons dans un débat difficile. Notamment, la théorie moderne de l'image de Kosslyn et collaborateurs (2006) est basée, en grande partie, sur des résultats d'études neurophysiologiques :

« In our view, the “mind” is what the brain does. [...] Thus knowing about what specific areas of the brain do and about the connections among brain areas can place major constraints on theories of mental processing. » (p. 134)

Selon ce point de vue, l'activation des zones motrices lors de tâches d'imagerie visuelle est suffisante pour affirmer l'implication d'une stratégie motrice en rotation mentale visuelle (Wraga et al., 2003). Du moins, un tel point de vue suggère que les études comportementales, en elles-mêmes, ne sont pas suffisantes pour évaluer les transferts implicites. Si nous avons observé un transfert perturbateur chez les personnes âgées faut-il interpréter ce résultat comme l'interférence d'une stratégie motrice en rotation mentale visuelle ? Les personnes âgées s'imaginent-elles « manipuler les objets d'une tâche de rotation mentale visuelle avec leurs mains » ? Cette manipulation mentale, impliquant les mains, peut-elle produire une amélioration de la précision et une perte de vitesse (perturbation) de la rotation mentale visuelle ? Ou bien, est-ce plutôt un « tradeoff » lié à d'autres variables contextuelles, ou individuelles, que nous n'avons pas pris en compte ? Ces questions pointent vers une limite d'interprétation de notre approche. Certains chercheurs décrivent néanmoins une nature distincte, mais complémentaire, des contributions des mécanismes d'imagerie motrice et d'imagerie visuelle lors d'une tâche d'objets (Sirigu & Duhamel, 2001). De même, un débat se poursuit quant à la spécificité des représentations motrices ou des représentations visuelles (Corinne & Mast, 2005). Ce débat rejoint aussi la question de la généralisation des apprentissages implicites transférés (Pascual-Leone, Grafman, & Hallett, 1994 ; Wraga et al., 2003). Certains chercheurs considèrent que les transferts implicites sont seulement possibles dans des contextes spécifiques (« rigid context-specific », Diennes & Berry, 1997), alors que d'autres considèrent que les effets d'entraînement peuvent transférer dans des contextes différents (Willingham, 1997, 1999). Ces questions méritent d'être considérées davantage dans d'autres recherches impliquant l'étude des transferts stratégiques en rotation mentale.

Perspectives :

- Dans l'Expérience 1b, nous avons démontré une corrélation significative entre la résolution correcte des items difficiles du MRT tactile et une mesure d'aptitudes visuo-spatiales (EFT), pouvant suggérer une appartenance du MRT tactile au même réseau nomologique de mesure que les aptitudes spatiales en général (i.e., intelligence visuo-spatiale ; rotation mentale visuelle ; etc.). Nous avons par ailleurs

démontré des facteurs de difficulté et des qualités psychométriques tactiles et visuels similaires. D'autres études seraient nécessaires pour développer une définition de la validité du MRT tactile, dans ce domaine d'aptitudes. La sensibilité de la mesure tactile (précision et vitesse d'exécution) suggère que les aptitudes spatiales tactiles (Stankov et al., 2001) peuvent contribuer à une compréhension des différences individuelles de traitement dans le raisonnement analogique plus général. Notamment, de nouvelles études pourraient intégrer l'analyse des différences inter-individuelles/inter-groupes entre hommes et femmes (Robert & Chevrier, 2003), entre jeunes adultes et personnes âgées (Norman, Bartholomew, & Burton, 2008), entre participants voyants et participants aveugles (Heller et al., 2006), etc. Ce test tactile peut ainsi servir dans plusieurs applications de recherche.

- Nous avons aussi utilisé des conditions tactiles unimanuelles dans l'Étude 1, alors que peu d'informations existent concernant les performances bimanuelles simultanées. Les performances bimanuelles seraient démontrées supérieures aux performances unimanuelles dans certains contextes (Ballesteros et al., 1997 ; Ballesteros & Heller, 2008). L'intérêt d'insérer une condition bimanuelle dans l'étude des transferts intermodaux de rotation mentale se justifie par la relative absence de publications à ce sujet.
- Dans ce travail nous avons évalué les transferts intermodaux pour la RM sur des stimuli cubes S-M (Shepard & Metzler, 1971 ; cf. Expérience 2). Nous avons confirmé une spécificité des traitements tactiles pour la perception et la rotation mentale d'objets tridimensionnels, sans expérience préalable. Découlant d'une étude ayant démontré l'appariement intermodal sur des objets plus simples en deux dimensions surélevées (Volcic et al., 2010), nous pouvons suggérer que nos résultats dépendent en partie des stimuli intégrant les tâches. Notamment, des études ont démontré un avantage des transferts tactiles pour des tâches de textures (Hatwell, 2000a) et spécialement lorsque le traitement s'effectue sur des textures fines (Ballesteros & Heller, 2008). De fait, nous pourrions utiliser différents stimuli en faisant varier la difficulté perceptuelle (i.e., par dimensions, textures). Dans l'optique de poursuivre le travail, entre autre, de Garbin et collaborateurs (Garbin & Bernstein, 2004 ; Garbin, 1988) sur l'analyse multidimensionnelle des objets, nous pourrions mener une étude des transferts intermodaux de rotation mentale (voir Figure 51a et 51b, p. 169), tout en faisant varier les stratégies d'exploration tactile et les stimuli utilisés.

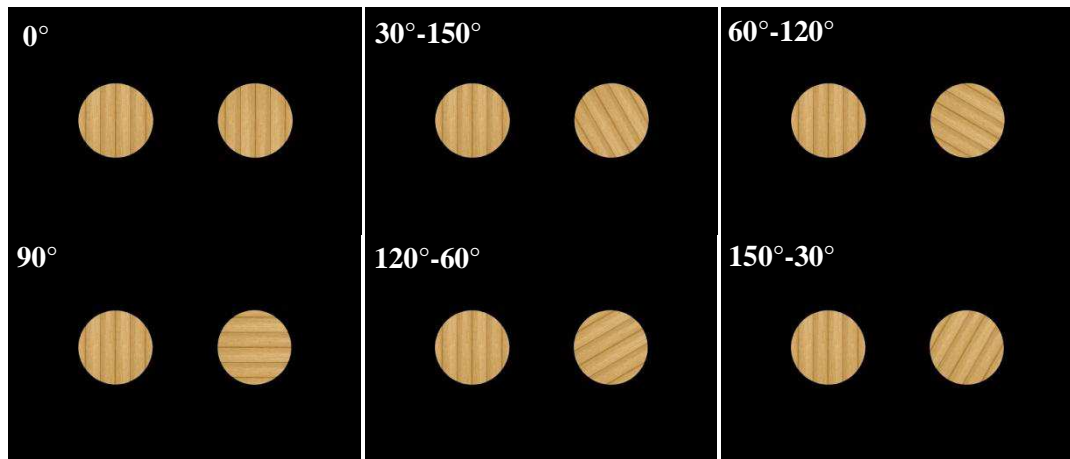
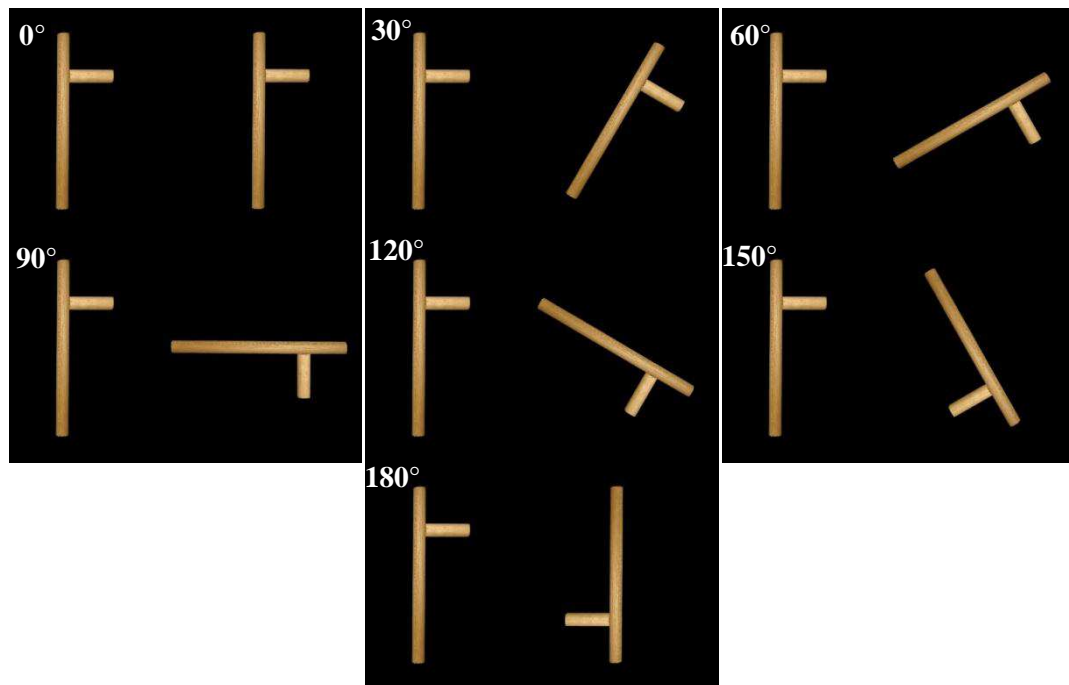
a) Discriminations de diagrammes et rotation mentale, textures spatiales surélevéesb) Discrimination de stimuli deux-dimensionnels surélevés et rotation mentale

Figure 51. Stimuli développés pour les études de la rotation mentale tactile, et les transferts intermodaux. a) Tâche de discrimination de diagrammes désorientés avec largeurs de traits variables. b) Tâche de discrimination de stimuli deux-dimensionnels similaires aux stimuli utilisés dans l'étude de Volcic et al., 2010.

- Dans l'optique où nous pouvons considérer les transferts intermodaux de rotation mentale comme découlant de capacités individuelles (Rose et al., 1998), des études seraient souhaitables concernant les déterminants individuels des transferts entre modalités sensorielles. Notamment, ces nouvelles études pourraient clarifier le rôle des différentes variables de rotation mentale (précision, temps de réponse, intercept, pente, stratégies cognitives) pour les transferts intermodaux. Les déterminants des apprentissages intramodaux en rotation mentale sont relativement

mal connus (Heil et al., 1998). Dans l'Expérience 2a, nous n'avons pas présenté les transferts sur les essais différents. Or, les essais différents ne nécessitent pas de rotation mentale (Cohen et al., 1996). En comparant les transferts d'essais identiques, contrôlés et comparés sur les transferts d'essais différents, nous pourrions évaluer la similarité ou la dissimilarité des transferts pour ces deux types d'essais. Si les transferts sont similaires pour ces deux types d'essais, nous pourrions alors suggérer que l'aptitude de rotation mentale n'est pas nécessairement transférée implicitement.

- D'autres études seraient nécessaires pour clarifier le modèle que nous avons proposé à la suite de l'Etude 1, concernant les transferts intermodaux sur les objets cubes S-M. Par exemple, une meilleure étude des stratégies de prise d'information serait utile pour évaluer les transferts stratégiques entre les deux modalités sensorielles. Si le traitement tactile est plutôt spatial, nous devrions pouvoir observer un traitement différencié entre conditions, en fonction de l'expérience préalable visuelle ou l'absence d'une expérience visuelle (Tactile-spatial-Visuel-IM vs. Tactile-spatial-IM). Des auteurs suggèrent par ailleurs des différences individuelles, concernant les styles cognitifs dans la résolution d'analogies spatiales visuelles : codes verbaux, spatiaux et/ou globaux/visuels (Blajenkova et al., 2006 ; Blajenkova & Kozhevnikov, 2009 ; Kozhevnikov et al., 2005 ; Kozhevnikov et al., 2002). Il serait alors intéressant de vérifier si ces différences individuelles sont applicables pour le traitement tactile d'objets complexes et comment elles interviennent dans les transferts intermodaux.
- Nous pouvons reconnaître les parties du corps humain par le toucher (Kitada, Johnsrude, Kochiyama, & Lederman, 2009). Récemment, deux études ont évalué le traitement tactile à des tâches d'imagerie motrice, sur des représentations tactiles de mains (Kitada, Dijkerman, Soo, & Lederman, 2010 ; Rangel et al., 2010), démontrant des résultats visuels et tactiles similaires. Une étude des transferts intermodaux pourrait être développée pour évaluer les similarités de traitement visuel et tactile à des tâches motrices. Ensuite, une étude similaire à celle exposée dans notre Etude 2, serait intéressante pour étudier les similarités/dissimilarités, intramodales, des représentations utilisées lors de tâches tactiles objets et de tâches tactiles mains. Notamment, il sera intéressant d'évaluer les spécificités des stratégies représentationnelles tactiles, pour des traitements variés tactiles.

– REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES –

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdi, H. (2007). The Bonferonni and šidak-Bonferonni corrections for multiple comparisons, In N. Salkind (Ed.) Encyclopedia of measurement and statistics. Thousand Oaks (CA): Sage.
- Abell, C., & Currie, G. (1999). Internal and external pictures. *Philosophical Psychology*, 12, 429-446.
- Ackerman, P. L. (1989). Individual differences in automatic and controlled processing. In P. L. Ackerman, R. J. Sternberg & R. Glaser (Eds.), *Learning and individual differences* (pp. 165-217). New York, Freeman.
- Albers, F., & Höft, S. (2009). 'Do it again and again. And again?' Übungseffekte bei einem computergestützten Test zum räumlichen Vorstellungsvermögen. *Diagnostica*, 55, 71-83.
- Alexander, G. M., & Son, T. (2007). Androgens and eye movements in women and men during a test of mental rotation ability. *Hom Behav*, 52, 197-204.
- Aloimonos, J., Weiss, I., & Bandyopadhyay, A. (1988). Active vision. *International Journal of Computer Vision*, 1, 333-356.
- Amedi, A., Jacobson, G., Hendler, T., Malach, R., & Zohary, E. (2002). Convergence of visual and tactile shape processing in the human lateral occipital complex. *Cerebral Cortex*, 12, 1202-1212.
- Amedi, A., Malach, R., Hendler, T., Peled, S., & Zohary, E. (2001). Visuo-haptic object-related activation in the ventral visual pathway. *Nature Neuroscience*, 4, 324-330.
- Amedi, A., Raz, N., Azulay, H., Malach, R., & Zohary, E. (2010). Cortical activity during tactile exploration of objects in blind and sighted humans. *Restor Neurol Neurosci*, 28, 143-156.

- Amick, M. M., Schendan, H. E., Ganis, G., & Cronin-Golomb, A. (2006). Frontostriatal circuits are necessary for visuomotor transformation: Mental rotation in Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, 44, 339-349.
- Amorim, M.-A., Isableu, B., & Jarraya, M. (2006). Embodied spatial transformations: "Body analogy" for the mental rotation of objects. *Journal of Experimental Psychology: General*, 135, 327-347.
- Anderson, J. R. (1978). Arguments concerning representations for mental imagery. *Psychological Review*, 85, 249-277.
- Anderson, J. R. (1979). Further arguments concerning representations for mental imagery: A response to Hayes-Roth and Pylyshyn. *Psychological Review*, 86, 395-406.
- Anderson, J. R., & Bower, G. H. (1973). *Human associative memory*. Oxford England: V. H. Winston & Sons.
- Baddeley, A. (2003). Working memory: Looking back and looking forward. *Nature reviews Neuroscience*, 4, 829-839.
- Baddeley, A. (1986). *Working memory*. New York, NY US: Clarendon Press/Oxford University Press.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (1974). Working memory. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation* Vol. 8 (pp. 47-89). New York: Academic Press.
- Ball, K., & Sekuler, R. (1982). A specific and enduring improvement in visual motion discrimination. *Science*, 218, 697-698.
- Ballard, D. H., Hayhoe, M. M., & Whitehead, S. D. (1992). Hand-eye coordination during sequential tasks. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B.*, 337, 331-339.

- Ballesteros, S. (2008). Implicit and explicit memory effects in haptic perception. In: M. Grunwald (Ed.), *Human haptic perception: basics and applications* (pp. 183-198). Basel, Birkhauser Verlag.
- Ballesteros, S., & Heller, M. A. (2008). Haptic object identification. In: M. Grunwald (Ed.), *Human haptic perception: basics and applications* (pp. 207-222). Basel, Birkhauser Verlag.
- Ballesteros, S., & Reales, J. M. (2006). Haptic priming and recognition in young adults, normal aging, and alzheimer's disease: evidence for dissociable memory systems. *In Touch and blindness: psychology and neuroscience*. (pp. 95-119). Mahwah, NJ US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Ballesteros, S., Manga, D., & Reales, J. M. (1997). Haptic discrimination of bilateral symmetry in 2-dimensional and 3-dimensional unfamiliar displays. *Perception & Psychophysics*, 59, 37-50.
- Ballesteros, S., Reales, J. M., & Manga, D. (1999). Implicit and explicit memory for familiar and novel objects presented to touch. *Psicothema*, 11, 785-800.
- Band, G. P. H., & Kok, A. (2000). Age effects on response monitoring in a mental-rotation task. *Biological Psychology*, 51, 201-221.
- Barquero, B. & Logie, R. H. (1999). Imagery constraints on quantitative and qualitative aspects of mental synthesis. *European Journal of Cognitive Psychology*, 11, 315-333.
- Beaumont, J. G. (2002). Activation and interference in tactile perception. *Neuropsychologia*, 19(1), 151-154.
- Behrmann, M., & Ewell, C. (2003). Expertise in tactile pattern recognition. *Psychological Science*, 14, 480-486.
- Berg, C., Hertzog, C., & Hunt, E. (1982). Age differences in the speed of mental rotation.

Developmental Psychology, 18, 95-107.

- Berger, C., & Hatwell, Y. (1996). Developmental trends in haptic and visual free classifications: Influence of stimulus structure and exploration on decisional processes. *Journal of Experimental Child Psychology*, 63, 447-465.
- Bethell-Fox, C. E., & Shepard, R. N. (1988). Mental rotation: Effects of stimulus complexity and familiarity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14, 12-23.
- Bethell-Fox, C. E., Lohman, D. F., & Snow, R. E. (1984). Adaptive reasoning: Componential and eye movement analysis of geometric analogy performance. *Intelligence*, 8, 205-238.
- Blajenkova, O., Kozhevnikov, M. & Motes, M. (2006). Object-Spatial Imagery: A New Self-Report Imagery Questionnaire. *Applied Cognitive Psychology*, 20, 239–263.
- Blazhenkova, O. & Kozhevnikov, M. (2009). The new object-spatial-verbal cognitive style model: Theory and measurement. *Applied Cognitive Psychology*, 23(5), 638-663.
- Bliss, I., & Hämäläinen, H. (2005). Different working memory capacity in normal young adults for visual and tactile letter recognition task. *Scand J Psychology*, 46, 247-251.
- Bliss, I., Kujala, T., & Hämäläinen, H. (2004). Comparison of blind and sighted participants' performance in a letter recognition working memory task. *Brain Res Cogn Brain Res*, 18, 273-277.
- Bode, S., Koeneke, S., & Jäncke, L. (2007). Different strategies do not moderate primary motor cortex involvement in mental rotation: a TMS study. *Behavioral and Brain Functions*, 3, 38.
- Bodegard, A., Geyer, S., Grefkes, C., Zilles, K., & Roland, P. E. (2001). Hierarchical processing of tactile shape in the human brain. *Neuron*, 31, 317-328.

- Bohlhalter, S., Fretz, C., & Weder, B. (2002). Hierarchical versus parallel processing in tactile object recognition: A behavioural-neuroanatomical study of aperceptive tactile agnosia. *Brain: A Journal of Neurology*, 125, 2537-2548.
- Bonda, E., Petrides, M., & Evans, A. (1996). Neural systems for tactual memories. *Journal of Neurophysiology*, 75, 1730-1737.
- Borst, G., Kievit, R. A., Thompson, W. L., & Kosslyn, S. M. (2011). Mental rotation is not easily cognitively penetrable. *Journal of Cognitive Psychology*, 23, 60-75.
- Bourque, P., Blanchard, L., & Vézina, J. (1990). Étude psychométrique de l'Échelle de dépression gériatrique. *Canadian Journal on Aging*, 9, 348-355.
- Briggs, S. D., Raz, N., & Marks, W. (1999). Age related deficits in generation and manipulation of mental images: I. the role of sensorimotor speed and working memory. *Psychology and Aging*, 14(3), 427-435.
- Brown, H. D., Kosslyn, S. M., & Dror, I. E. (1998). Aging and scanning of imagined and perceived visual images. *Experimental Aging Research*, 24, 181-194.
- Brumaghin, S. H., & Brown, D. R. (1969). Perceptual equivalence between visual and tactual stimuli: An anchoring study. *Perception & Psychophysics*, 4, 175-179.
- Bushnell, E. W., & Baxt, C. (1999). Children's haptic and cross-modal recognition with familiar and unfamiliar objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 1867-1881.
- Buswell, G. T. (1935). *How People Look at Pictures: A Study of The Psychology of Perception in Art*. The University of Chicago Press, Chicago.
- Caissie, A. F., Vigneau, F., & Bors, D. A., (2009). What does the Mental Rotation Test measure? An analysis of item difficulty and item characteristics. *The Open Psychology Journal*, 2, 94-102.

- Caissie, A. F., & Vigneau, F. (2010). Le Test des Rotations mentales. Caractéristiques d'items et différences individuelles. In A. de Ribaupierre et al. (dir.), *Identité et spécificités de la psychologie différentielle* (pp. 75-80). Rennes : Presses universitaires de Rennes.
- Caissie, A. F. (2010). *Analyse d'un test d'aptitudes spatiales – Le Test de rotation mentale*. Sarrebruck : Éditions Universitaires Européennes.
- Carpenter, P. A., & Eisenberg, P. (1978). Mental rotation and the frame of reference in blind and sighted individuals. *Perception & Psychophysics*, 23, 117-124.
- Carroll, J. B. (1993). *Human cognitive abilities: a survey of factor analytic studies*. New York: Cambridge Univ. Press.
- Carter, H., & Loo, R. (1980). Group Embedded-Figures Test: Psychometric data. *Perceptual and Motor Skills*, 50, 32-34.
- Caselli R. J. (1991). Rediscovering tactile agnosia. *Mayo ClinProc*, 66, 129-142.
- Casey, M. B., & Brabeck, M. M. (1989). Exceptions to the male advantage on a spatial task: Family handedness and college major as factors identifying women who excel. *Neuropsychologia*, 27, 689-696.
- Cattaneo, Z., & Vecchi, T. (2008). Supramodal effects in visual and haptic spatial processes. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory ad Cognition*, 34, 631-642.
- Cohen, M. S., Kosslyn, S. M., Breiter, H. C., & DiGirolamo, G. J. (1996). Changes in cortical activity during mental rotation: A mapping study using functional MRI. *Brain: A Journal of Neurology*, 119, 89-100.
- Cohen, D. J., & Blair, C. (1998). Mental rotation and temporal contingencies. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 70, 203-214.

- Coluccia, E., Mammarella, I. C., & Cornoldi, C. (2009). Centered egocentric, de-centered egocentric, and allocentric spatial representations in the peripersonal space of congenital total blindness. *Perception*, 38, 679-693.
- Cooke, T., Jäckel, F., Wallraven, C., & Bülthoff, H. H. (2007). Multimodal similarity and categorization of novel, three-dimensional objects. *Neuropsychologia*, 45, 484-495.
- Cooper, L. A., & Shepard, R. N. (1975). Mental transformation in the identification of left and right hands. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1, 48-56.
- Cooper, L. A., Shepard, R. N., & Chase, W. G. (1973). Chronometric studies of the rotation of mental images. In *Visual information processing*. Oxford England: Academic.
- Corballis, M. C. (1988). Distinguishing clockwise from counterclockwise: Does it require mental rotation? *Memory & Cognition*, 16, 567-578.
- Corballis, M. C. (1997). Mental rotation and the right hemisphere. *Brain and Language*, 57, 100-121.
- Corballis, M.C., & McMaster, H. (1996). The roles of stimulus-response compatibility and mental rotation in mirror-image and left-right decisions. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 50, 397-401.
- Corinne, J., & Mast, F. W. (2005). Mental object rotation and egocentric body transformation: two dissociable processes? *Spatial Cognition and Computation*, 5, Special issue: Spatial and Visual Components in Mental Reasoning about Space, 217-237.
- Cornoldi, C., & Vecchi, T. (2000). Mental imagery in blind people: the role of passive and active visuospatial processes. In: M. A. Heller (Ed.), *Touch, representation and blindness* (143–182). Oxford University Press, Oxford, UK.

- Cornoldi, C., Calore, D., & Pra-Baldi, A. (1979). Imagery ratings and recall in congenitally blind subjects. *Perceptual and Motor Skills*, 48, 627-639.
- Cornoldi, C., Cortesi, A., & Preti, D. (1991). Individual differences in the capacity limitations of visuospatial short-term memory: Research on sighted and totally congenitally blind people. *Memory & Cognition*, 19, 459-468.
- Cornoldi, C., De Beni, R., Giusberti, F., & Massironi, M. (1998). Memory and imagery: A visual trace is not a mental image. In: M.A Conway, S.E. Gathercole & C. Cornoldi (Eds.), *Theories of Memory*, vol. II (pp. 87-110). Hove UK: Psychology Press.
- Craver-Lemley, C., & Arterberry, M. E. (2001). Imagery-induced interference on a visual detection task. *Spatial Vision*, 14, 101-119.
- Craver-Lemley, C., & Reeves, A. (1992). How visual imagery interferes with vision. *Psychological Review*, 99, 633-649.
- DeAngelus, M., & Pelz, J. (2009). Top-down control of eye movements: Yarbus revisited. *Visual Cognition*, 17, 790–811.
- Deibert, E., Kraut, M., Kremen, S., & Hart, J., Jr. (1999). Neural pathways in tactile object recognition. *Neurology*, 52, 1413-1417.
- De Jong., R., Berendsen, E., Cools, R. (1999). Goal neglect and inhibitory limitations: dissociable causes of interference effects. *Acta psychologica*, 101, 379-394.
- Dellantonio, A., & Spagnolo, F. (1990). Mental rotation of tactual stimuli. *Acta Psychologica*, 73, 245-257.
- Dennett, D. C. (2002). Does your brain use the images in it, and if so, how? *Behavioral and Brain Sciences*, 25, 189-190.
- Dienes, Z., & Berry, D. (1997). Implicit learning: below the subjective threshold. *Psychonomic Bulletin and Review*, 4, 3-23.

- Dinse, H. R., Ragert, P., Pleger, B., Schwenkreis, P., & Tegenthoff, M. (2003). GABAergic mechanisms gate tactile discrimination learning. *NeuroReport: For Rapid Communication of Neuroscience Research*, 14, 1747-1751.
- Dinse, H. R., Wilimzig, C., & Kalisch, T. (2008). Learning effects in haptic perception. In: Martin Grunwald (Ed.), *Human haptic perception: basics and applications.*, Birhäuser Verlag, Basel, Switzerland.
- Dirkx, E., & Craik, F. I. M. (1992). Age related differences in memory as a function of imagery processing. *Psychology and Aging*, 7, 352-358.
- Driver J, & Noesselt, T. (2008). Multisensory interplay reveals crossmodal influences on “sensory-specific” brain regions, neural responses, and judgments. *Neuron*, 57, 11–23.
- Dror, I. E., & Kosslyn, S. M. (1994). Mental imagery and aging. *Psychology and Aging*, 9, 90-102.
- Dror, I. E., Schmitz-Williams, I. C., & Smith, W. (2005). Older Adults Use Mental Representations That Reduce Cognitive Load: Mental Rotation Utilizes Holistic Representations and Processing. *Experimental Aging Research*, 31, 409-420.
- Duchowski, A. T. (2003). *Eye tracking methodology : Theory and practice*. Springer-Verlag, London, UK.
- Easton, R. D., Greene, A. J., & Srinivas, K. (1997a). Transfer between vision and haptics: Memory for 2-D patterns and 3-D objects. *Psychonomic Bulletin & Review*, 4, 403-410.
- Easton, R. D., Srinivas, K., & Greene, A. J. (1997b). Do vision and haptics share common representations? Implicit and explicit memory within and between modalities. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 23, 153-163.

- Egan, D. E. (1978, August). Characterizing spatial ability : Different mental processes reflected in accuracy and latency scores (Res. Rep. No. 1250). Pensacola, FL: Naval Aerospace Medical Research Lab.
- Ellis, R. R., & Lederman, S. J. (1993). The role of haptic versus visual volume cues in the size-weight illusion. *Perception & Psychophysics*, 53, 315-324.
- Ernst, M. O., Lange, C., & Newell, F. N. (2007). Multisensory recognition of actively explored objects. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 61, 242-253.
- Facchini, S., Romani, M., Tinazzi, M., & Aglioti, S. M. (2002). Time-related changes of excitability of the human motor system contingent upon immobilization of the ring and little fingers. *Clinical Neurophysiology*, 113, 367-375.
- Farah, M. J. (1988). Is visual imagery really visual? Overlooked evidence from neuropsychology. *Psychological Review*, 95, 307-317.
- Farah, M. J., Hammond, K. M., Levine, D. N., & Calvanio, R. (1988). Visual and spatial mental imagery: Dissociable systems of representation. *Cognitive Psychology*, 20, 439-462.
- Findlay, J. M., & Gilchrist, I. D. (2003). *Active vision: The psychology of looking and seeing*. New York, NY US: Oxford University Press.
- Finke, R. A. & Shepard, R. N. (1986). Visual functions of mental imagery. In K. R. Boff, L. Kaufman, & J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of perception and human performance* (pp. 37-55). New-York: Wiley-Interscience.
- Finke, R. A., & Kosslyn, S. M. (1980). Mental imagery acuity in the peripheral visual field. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 6, 126-139.
- Fitzhugh, S., Shipley, T. F., Newcombe, N., McKenna, K., & Dumay, D. (2008). Mental

- rotation of real world Shepard-Metzler figures: An eye tracking study. *Journal of Vision*, 8, 648.
- Freides, D. (1974). Human information processing and sensory modality: Cross-modal functions, information complexity, memory, and deficit. *Psychological Bulletin*, 57, 284-310.
- Furry, C., & Schaie, K. W. (1979). Pretest activity and intellectual performance in middle-aged and older persons. *Experimental Aging Research*, 5, 413-421.
- Gabbard, C., Cordova, A., & Caçola, P. (2011). Is there an advanced aging effect on the ability to mentally represent action? *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 53, 206-209.
- Gallace, A., & Spence, C. (2010). Touch and the body: The role of the somatosensory cortex in tactile awareness. *Psyche: An Interdisciplinary Journal of Research on Consciousness*, 16, 30-67.
- Gallina, J.-M. (2006). *Les représentations mentales*. Dunod, Paris.
- Ganis, G., Keenan, J. P., Kosslyn, S. M., & Pascual-Leone, A. (2000). Transcranial magnetic stimulation of primary motor cortex affects mental rotation. *Cerebral Cortex*, 10, 175-180.
- Garbin, C. P. (1988). Visual-haptic perceptual nonequivalence for shape information and its impact upon cross-modal performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14, 547-553.
- Garbin, C. P. (1990). Visual-touch perceptual equivalence for shape information in children and adults. *Perception & Psychophysics*, 48, 271-279.
- Garbin, C. P., & Bernstein, I. H. (1984). Visual and haptic perception of three-dimensional solid forms. *Perception & Psychophysics*, 36, 104-110.
- Geiser, C., Lehmann, W., & Eid, M. (2006). Separating 'Rotators' From 'Nonrotators' in the

Mental Rotations Test: A Multigroup Latent Class Analysis. *Multivariate Behavioral Research*, 41, 261-293.

Gentaz E. (2009). *La main, le cerveau et le toucher*. Paris: Dunod.

Gentaz, E., & Badan, M. (2000). Organisation anatomo-fonctionnelle de la perception tactile: apports de la neuropsychologie et de l'imagerie cérébrale. In Y. Hatwell, A. Streri et E. Gentaz (Eds.), *Toucher pour connaître : Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle* (pp. 35-50). Paris Presses universitaires de France.

Gentaz, E., & Hatwell, Y. (2000). Le traitement haptique des propriétés spatiales et matérielles des objets. In Y. Hatwell, A. Streri et E. Gentaz (Eds.), *Toucher pour connaître : Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle* (pp. 129-162). Paris Presses universitaires de France.

Gentaz, E., Hatwell, Y., & Streri, A. (2003). Haptic processing of spatial and material object properties. In *Touching for knowing: Cognitive psychology of haptic manual perception*. (pp. 123-159). Amsterdam Netherlands: John Benjamins Publishing Company.

Gentili, R., Han, C. E., Schweighofer, N., & Papaxanthis, C. (2010). Motor learning without doing: Trial-by-trial improvement in motor performance during mental training. *Journal of Neurophysiology*, 104, 774-783.

Gibson, E. J. (1953). Improvement in perceptual judgments as a function of controlled practice or training. *Psychological Bulletin*, 50, 401-431.

Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Oxford England: Houghton Mifflin.

Goldstein, D., Haldane, D., & Mitchell, C. (1990). Sex differences in visual-spatial ability: The role of performance factors. *Memory & Cognition*, 18, 546-550.

Goldstone, R. L. (1998). Perceptual learning. *Annual Review of Psychology*, 49, 585-612.

- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, 15, 20-25.
- Grondin, S., Kuroda, T., & Mitsudo, T. (2011). Spatial effects on tactile duration categorization. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 65, 163-167.
- Grunwald, M. (2008). Preface. In: M. Grunwald (Ed.), *Human haptic perception: basics and applications* (pp. vii-ix). Basel, Birkhauser Verlag.
- Hair, J. E., Anderson, R. E., Tatham, R. L., & Black, W. C. (1998). *Multivariate data analysis* (5th ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- Hasher, L., Zacks, R. T. (1988). Working memory, comprehension, and aging: A review and a new view. In: Bower GH, editor. *The psychology of learning and motivation*, Vol 22. New York: Academic Press, p. 193–225.
- Hatwell, Y. (1983). The effects of previous visual experience on haptic performances of sighted and blind children. In E. Horn (Ed.), *Multimodal convergence in sensory systems* (pp. 325-333).Stuttgart and New York: Gustav Fischer Verlag.
- Hatwell, Y., Streri, A., & Gentaz, E. (2000). *Toucher pour connaître*. Paris : PUF.
- Hatwell, Y. (2000a). Les procédures d'exploration manuelle chez l'enfant et l'adulte. In Y. Hatwell, A. Streri et E. Gentaz (Eds.), *Toucher pour connaître : Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle* (pp. 71-84). Paris Presses universitaires de France.
- Hatwell, Y. (2000b). Les coordinations intermodales chez l'enfant et l'adulte. In Y. Hatwell, A. Streri et E. Gentaz (Eds.), *Toucher pour connaître : Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle* (pp. 211-224). Paris Presses universitaires de France.
- Hayhoe, M. M. (2004). Advances in relating eye movements and cognition. *Infancy*, 6,

267-274.

Hébert, R., Bravo, G., & Girouard, D. (1992). Validation de l'Adaptation Française du Modified Mini-Mental State (3MS). *Revue de Gériatrie*, 17, 443-450.

Heil, M., Rösler, F., Link, M., & Bajric, J. (1998). What is improved if a mental rotation task is repeated—the efficiency of memory access, or the speed of a transformation routine? *Psychological Research*, 61, 99-106.

Helbig, H. B., & Ernst, M. O. (2007). Knowledge about a common source can promote visual--haptic integration. *Perception*, 36, 1523-1533.

Helbig, H. B., & Ernst, M. O. (2008). Visual-haptic cue weighting is independent of modality-specific attention. *Journal of Vision*, 8, 1-16.

Held, R., Ostrovsky, Y., De Gelder, B., & Sinha, P. (2008). Revisiting the molyneux question. *Journal of Vision*, 8, p. 523.

Held, R., Ostrovsky, Y., de Gelder, B., Gandhi, T., Ganesh, S., Mathur, U., et al. (2011). The newly sighted fail to match seen with felt. *Nature Neuroscience*, 14, 551-553.

Held, R., Ostrovsky, Y., de Gelder, B., Gandhi, T., Ganesh, S., Mathur, U., et al. (2011). 'The newly sighted fail to match seen with felt': Corrigendum. *Nature Neuroscience*, 14, 551-553.

Heller, M. A. (2000). Introduction: the theoretical context for the dialog. In: M. A. Heller (Ed.), *Touch, representation and blindness* (1–26). Oxford University Press, Oxford, UK.

Heller, M. A., & Ballesteros, S. (2006). Introduction: approaches to touch and blindness. In M. A. Heller & S. Ballesteros (Eds.), *Touch and blindness: psychology and neuroscience*. (pp. 1-21). Mahwah, NJ US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.

- Heller, M. A., & Joyner, T. D. (1993). Mechanisms in the haptic horizontal-vertical illusion: Evidence from sighted and blind subjects. *Perception & Psychophysics*, 53(4), 422-428.
- Henderson, J. M., & Hollingworth, A. (1999). The role of fixation position in detecting scene changes across saccades. *Psychological Science*, 10, 438-443.
- Hershberger, W. A., & Misceo, G. F. (1996). Touch dominates haptic estimates of discordant visual-haptic size. *Perception & Psychophysics*, 58, 1124-1132.
- Homa, D. (1984). On the nature of categories. In: G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation*, Vol. 18 (pp. 49-94). New York: Academic Press.
- Homa, D., Kahol, K., Tripathi, P., Bratton, L., & Panchanathan, S. (2009). Haptic concepts in the blind. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71, 690-698.
- Howard, I. (1982). *Human visual orientation*. Chichester: Wiley.
- Hoyek, N., Collet, C., & Guillot, A. (2010). Représentation mentale et processus moteur: Le cas de la Rotation Mentale. *Science & Motricité*, 71, 29-41.
- Hoyer, W. J. and P. Verhaeghen (2006). *Memory Aging*. Handbook of the Psychology of Aging. J. E. Birren and K. W. Schaie. Burlington, MA, Elsevier Academic Press.
- Hsiao, S. S., Johnson, K. O., & Twombly, I. A. (1993). Roughness coding in the somatosensory system. *Acta Psychologica*, 84, 53-67.
- Huber, R., Ghilardi, M. F., Massimini, M., Ferrarelli, F., Riedner, B. A., Peterson, M. J., & Tononi, G. (2006). Arm immobilization causes cortical plastic changes and locally decreases sleep slow wave activity. *Nature Neuroscience*, 9, 1169-1176.
- Ittyerah, M. (2010). Haptic touch and hand ability. In: M. H. Zadeh (Ed.), *Advances in haptics* (pp.463-480). www.intechopen.com/articles/show/title/haptic-touch-and-hand-ability.

- Iwamura, Y., & Tanaka, M. (1978). Functional organization of receptive fields in the cat somatosensory cortex: I. Integration within the coronal region. *Brain Research*, 151, 49-60.
- Iwata, H. (2008). History of haptic interface. In: M. Grunwald (Ed.), *Human haptic perception: basics and applications* (pp. 355-361). Basel, Birkhauser Verlag.
- Jackson, P. L., Lafleur, M. F., Malouin, F., Richards, C., Doyon, J. (2001). Potential role of mental practice using motor imagery in neurologic rehabilitation. *Arch Phys Med Rehabil*, 82, 1133-41.
- Jacobs, R. (1999). Computational studies of the development of functionally specialized neural modules: *Trends in Cognitive Sciences*, 3, 31-38.
- James, T. W., Humphrey, G. K., Gati, J. S., Servos, P., Menon, R. S., & Goodale, M. A. (2002). Haptic study of three-dimensional objects activates extrastriate visual areas. *Neuropsychologia*, 40, 1706-1714.
- James, T. W., James, K. H., Humphrey, G. K., & Goodale, M. A. (2006). Do visual and tactile object representations share the same neural substrate? In M. A. Heller & S. Ballesteros (Eds.), *Touch and blindness: Psychology and neuroscience*. (pp. 139-155). Mahwah, NJ US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- James, T. W., Kim, S., & Fisher, J. S. (2007). The neural basis of haptic object processing. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 61, 219-229.
- James, T.W., Culham, J.C., Humphrey, G. K., Milner, A. D., & Goodale, M. A. (2003). Ventral occipital lesions impair object recognition but not object-directed grasping: A fMRI study. *Brain*, 126, 2463-2475.
- Jeannerod, M. (1995). Mental imagery in the motor context. *Neuropsychologia*, 33, 1419-1432.

- Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *Neuroimage*, 14, 103-109.
- Jansson, G., & Monaci, L. (2004). Haptic identification of objects with different numbers of Fingers. In: S. Ballesteros & M. A. Heller (Eds.), *Touch, Blindness and Neuroscience* (pp. 209-219). UNED press, Madrid, Spain.
- Johansson, R. S., Westling, G. r., Backstrom, A., & Flanagan, J. R. (2001). Eye-hand coordination in object manipulation. *The Journal of Neuroscience*, 21, 6917-6932.
- Jones, B., & Connolly, K. (1970). Memory effects in cross-modal matching. *Br J Psychol*, 61, 267-270.
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1976). Eye fixations and cognitive processes. *Cognitive Psychology*, 8, 441-480.
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1985). Cognitive coordinate systems: Accounts of mental rotation and individual differences in spatial ability. *Psychological Review*, 92, 137-172.
- Kaas A.L., Stoeckel, M.C., & Goebel R. (2008). The Neural Bases of Haptic Working Memory. In: Martin Grunwald (Ed.), *Human haptic perception: basics and applications.*, Birhäuser Verlag, Basel, Switzerland.
- Katz D (1989) *The world of touch*. Hillsdale, NJ: Erlbaum (Krueger, L.E., traducteur; première version publiée en 1925).
- Kawamichi, H., Kikuchi, Y., Noriuchi, M., Senoo, A., & Ueno, S. (2007). Distinct neural correlates underlying two- and three-dimensional mental rotations using three-dimensional objects. *Brain Research*, 1144, 117-126.
- Kellman, P. J. (2002). Perceptual learning. In H. Pashler & R. Gallistel (Eds.), *Steven's handbook of experimental psychology* (3rd ed.), Vol. 3: Learning, motivation, and emotion. (pp. 259-299). Hoboken, NJ US: John Wiley & Sons Inc.

- Kennett, S., Taylor-Clarke, M., & Haggard, P. (2001). Noninformative vision improves the spatial resolution of touch in humans. *Current Biology*, 11, 1188-1191.
- Kerguelen, A. (2008). "Actogram Kronos": un outil d'aide à l'analyse de l'activité. In H. Norimatsu & N. Pigem (Eds), *Les techniques d'observation en sciences humaines* (pp. 142-158). Paris : Armand Collin.
- Kerst, S. M., & Howard, J. H. (1978). Memory psychophysics for visual area and length. *Memory & Cognition*, 6, 327-335.
- Kitada, R., Johnsrude, I. S., Kochiyama, T., Lederman, S. J. (2009). Functional specialization and convergence in the occipitotemporal cortex supporting haptic and visual identification of human faces and body parts: An fMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21, 2027-2045.
- Kitada, R., Kito, T., Saito, D. N., Kochiyama, T., Matsumura, M., Sadato, N., et al. (2006). Multisensory activation of the intraparietal area when classifying grating orientation: A functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Neuroscience*, 26, 7491-7501.
- Kitada, R., Dijkerman, C., Soo, G., & Lederman, S. J. (2010). Representing human hands haptically or visually from first- vs. third-person perspectives. *Perception*, 39, 236-254.
- Klatzky, R. L., & Lederman, S. J. (2007). Object recognition by touch. In J. Rieser, D., Ashmead, F. Ebner, & A. Corn (Eds.), *Blindness and brain plasticity in navigation and object perception* (pp. 185-207). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Klatzky, R. L., & Lederman, S. J. (1993). Toward a computational model of constraint-driven exploration and haptic object identification. *Perception*, 22, 597-621.
- Klatzky, R. L., & Lederman, S. J. (1995). Identifying objects from a haptic glance. *Perception & Psychophysics*, 57, 1111-1123.

- Klatzky, R. L., & Lederman, S. J. (2000). L'identification haptique des objets significatifs. In Y. Hatwell, A. Streri et E. Gentaz (Eds.), *Toucher pour connaître : Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle* (pp. 109-128). Paris Presses universitaires de France.
- Klatzky, R. L., Lederman, S. J., & Metzger, V. A. (1985). Identifying objects by touch: An 'expert system.' *Perception & Psychophysics*, 37, 299-302.
- Klatzky, R. L., Lederman, S. J., & Reed, C. (1987). There's more to touch than meets the eye: The salience of object attributes for haptics with and without vision. *Journal of Experimental Psychology: General*, 116, 356-369.
- Kosslyn, S. M. (1973). Scanning visual images: Some structural implications. *Perception & Psychophysics*, 14, 90-94.
- Kosslyn, S. M. (1994). *Image and Brain. The resolution of the imagery debate.* Cambridge: MIT press.
- Kosslyn, S. M., Ball, T. M., & Reiser, B. J. (1978). Visual images preserve metric spatial information: Evidence from studies of image scanning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 4, 47-60.
- Kosslyn, S. M., Digirolamo, G. J., Thompson, W. L., & Alpert, N. M. (1998). Mental rotation of objects versus hands: Neural mechanisms revealed by positron emission tomography. *Psychophysiology*, 35(2), 151-161.
- Kosslyn, S. M., Thompson, W. L., & Ganis, G. (2006). *The Case For Mental Imagery.* New York: Oxford University Press.
- Kosslyn, S. M., Thompson, W. L., Wraga, M., & Alpert, N. M. (2001). Imagining rotation by endogenous versus exogenous forces: Distinct neural mechanisms. *NeuroReport: For Rapid Communication of Neuroscience Research*, 12, 2519-2525.

- Kowler, E. (1990). The role of visual and cognitive processes in the control of eye movement. In E. Kowler (Ed.), *Eye Movements and Their Role in Visual and Cognitive Processes* (pp. 1-70). Elsevier, Amsterdam.
- Kozhevnikov, M., Kosslyn, S., & Shephard, J. (2005). Spatial versus object visualizers: A new characterization of visual cognitive style. *Memory & Cognition*, 33, 710-726.
- Kozhevnikov, M., Hegarty, M. & Mayer, R. E. (2002). Revising the visualizer/verbalizer dimension: Evidence for two types of visualizers. *Cognition and Instruction*, 20, 47-77.
- Kramer, A. F., Humphrey, D. G., Larish, J. F., Logan, G. D., & Strayer, D. L. (1994). Aging and inhibition: beyond a unitary view of inhibitory processing in attention. *Psychology and aging*, 9, 491-512.
- Kramer, A. F., Larish, J. F., Strayer, D. L. (1995). Training for attentional control in dual-task settings: A comparison of young and old adults. *J Exp Psychol Applied.*, 1, 50-76.
- Kramer, A. F., Larish, J. F., Strayer, D.L. (1999). Training for executive control: Task coordination strategies and aging. In: Gopher D, Koriat A, editors. *Attention and Performance XVII*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Lacey, S., & Campbell, C. (2006). Mental representation in visual/haptic crossmodal memory: Evidence from interference effects. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59, 361-376.
- Lacey, S., & Sathian, K. (2008). Haptically evoked activation of visual cortex. In: M. Grunwald (Ed.), *Human haptic perception: basics and applications* (pp. 251-257). Basel, Birkhauser Verlag.
- Lacey, S., Peters, A., Sathian, K. (2007) Cross-modal object recognition is viewpoint-independent. *PLoS ONE*, 2 (9). e890.

- Lacey, S., Pappas, M., Kreps, A., Lee, K., & Sathian, K. (2009). Perceptual learning of view-independence in visuo-haptic object representations. *Experimental Brain Research*, 198, 329-337.
- Lacey, S., Tal, N., Amedi, A., & Sathian, K. (2009). A putative model of multisensory object representation. *Brain Topography*, 12, 269-274.
- Laguna, K. D., & Babcock, R. (2000). Computer testing of memory across the adult life span. *Experimental Aging Research*, 26, 229-243.
- Lakatos, S., & Marks, L. E. (1999). Haptic form perception: Relative salience of local and global features. *Perception & Psychophysics*, 61, 895-908.
- Land, M., Mennie N., & Rusted, J. (1999). The roles of vision and eye movements in the control of activities of daily living. *Perception*, 28, 1311-1328.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1987). Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology*, 19, 342-368.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1990). Haptic classification of common objects: Knowledge-driven exploration. *Cognitive Psychology*, 22, 421-459.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1997). Relative availability of surface and object properties during early haptic processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23, 1680-1707.
- Lien, M.-C., Ruthruff, E., & Kuhns, D. (2008). Age-related differences in switching between cognitive tasks: Does internal control ability decline with age? *Psychology and Aging*, 23, 330-341.
- Liepert, J., Tegenthoff, M., & Makin, J. P. (1995). Changes of cortical motor area size during immobilization. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 97, 382-386.

- Liversedge, S. P., & Findlay, J. M. (2000). Saccadic eye movements and cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 6-14.
- Locher, P. J., & Simmons, R. W. (1978). Influence of stimulus symmetry and complexity upon haptic scanning strategies during detection, learning, and recognition tasks. *Perception & Psychophysics*, 23, 110-116.
- Logie, R. H. & Helstrup, T. (1999). Introduction. *European Journal of Cognitive Psychology*, 11, 289-294.
- Lohse, G. L., & Johnson, E. J. (1996). A comparison of two process tracing methods for choice tasks. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 68, 28-43.
- Loomis, J. M. (1981). On the tangibility of letters and braille. *Perception & Psychophysics*, 29, 37-46.
- Loomis, J. M., Klatzky, & Lerman, S. J. (1991). Similarity of tactual and visual picture recognition with limited field of view. *Perception*, 20, 167-177.
- Mackworth, N. H., & Morandi, A. J. (1967). The gaze selects informative details within pictures. *Perception & Psychophysics*, 2, 547-552.
- Malouin, F., Belleville, S., Richards, C. L., Desrosiers, J., Doyon, J. (2004). Working memory and mental practice outcomes after stroke. *Arch Phys Med Rehabil*, 85, 177-83.
- Manganotti, P., Zanette, G., Bonato, C., Tinazzi, M., Polo, A., & Fiaschi, A. (1997). Crossed and direct effects of digital nerves stimulation on motor evoked potential: a study with magnetic brain stimulation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* **105**, 280-289.
- Marmor, G. S., & Zaback, L. A. (1976). Mental rotation by the blind: Does mental rotation depend on visual imagery? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2, 515-521.

- Marr, D. (1982). *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. New York: Freeman.
- McMahon, C. E. (1973). Images as motives and motivators: A historical perspective. *The American Journal of Psychology*, 86, 465-490.
- Meijman, T. F. (2000). The theory of the stop-emotion: On the functionality of fatigue. In D. Pogorski & W. Karwowski (Eds.), *Ergonomics and safety for global business quality and production* (pp. 45-50). Warschaw: CIOP.
- Mellet, E., Tzourio, N., Crivello, F., Joliot, M., Denis, M., & Mazoyer, B. (1996). Functional anatomy of spatial mental imagery generated from verbal instructions. *The Journal of Neuroscience*, 16, 6504-6512.
- Meredith, M. A. (2002). On the neural basis for multisensory convergence: a brief overview. *Cognitive Brain Research*, 14, 31-40.
- Meredith, M. A. (2002). On the neuronal basis for multisensory convergence: A brief overview. *Cognitive Brain Research*, 14, 31-40.
- Metzler, J., Shepard, R. N., & Solso, R. L. (1974). Transformational studies of the internal representation of three-dimensional objects. In *Theories in cognitive psychology: The Loyola Symposium*. Oxford England: Lawrence Erlbaum.
- Millar, S. (2000). Modality and mind: convergent active processing in interrelated networks as a model of development and perception by touch. In: M. A. Heller (Ed.), *Touch, representation and blindness* (99–142). Oxford University Press, Oxford, UK.
- Millar, S. (1975). Spatial memory by blind and sighted children. *British Journal of Psychology*, 66(4), 449-459.
- Millar, S. (1994). *Understanding and representing space: theory and evidence from studies with blind and sighted children*. New York, NY US: Clarendon Press/Oxford

University Press.

Millar, S. (2006). Processing spatial information from touch and movement: implications from and for neuroscience. In M. A. Heller & S. Ballesteros (Eds.), *Touch and blindness: psychology and neuroscience*. (pp. 25-48). Mahwah, NJ US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.

Millar, S., & Al-Attar, Z. (2002). The Müller-Lyer illusion in touch and vision: Implications for multisensory processes. *Perception & Psychophysics*, 64, 353-365.

Millar, S., & Al-Attar, Z. (2004). External and body-centered frames of reference in spatial memory: Evidence from touch. *Perception & Psychophysics*, 66, 51-59.

Millar, S., & Al-Attar, Z. (2005). What aspects of vision facilitate haptic processing? *Brain and Cognition*, 59, 258-268.

Miller, E. A. (1972). Interaction of vision and touch in conflict and nonconflict form perception tasks. *Journal of Experimental Psychology*, 96, 114-123.

Moisello, C., Bove, M., Huber, R., Giovanni, A., Battaglia, F., Tononi, G., & Ghilardi, M. F. (2008). Short-term limb immobilization affects motor performance. *Journal of Motor Behavior*, 40, 165-176.

Morgan, M. J. (1977). *Molyneux's question: Vision, touch and the philosophy of perception*. Oxford England: Cambridge U Press.

Mulder, T., Hochstenbach, J. B. H., van Heuvelen, M. J. G., & den Otter, A. R. (2007). Motor imagery: The relation between age and imagery capacity. *Human Movement Science*, 26, 203-211.

Murphy, S. M. (1990). Models of imagery in sport psychology: A review. *Journal of Mental Imagery*, 14, 153-172.

- Hoyek, N., Collet, C., & Guillot, A. (2010). Représentation mentale et processus moteur: le cas de la rotation mentale. *Science & Motricité*, 71, 29–41.
- Newell, F. N., Ernst, M. O., Tjan, B. S., & Bühlhoff, H. H. (2001). Viewpoint dependence in visual and haptic object recognition. *Psychological Science*, 12, 37-42.
- Newnham, C., & McKenzie, B. E. (1993). Cross-modal transfer of sequential visual and haptic shape information by clumsy children. *Perception*, 22, 1061-1073.
- Newport, R., Rabb, B., & Jackson, S. R. (2002). Noninformative vision improves haptic spatial perception. *Current Biology*, 12(19), 1661-1664.
- Norman, J. F., Bartholomew, A. N., & Burton, C. L. (2008). Aging preserves the ability to perceive 3-D object shape from static but not deforming boundary contours. *Acta Psychologica*, 129, 198-207.
- Norman, J. F., Norman, H. F., Clayton, A. M., Lianekhammy, J., & Zielke, G. (2004). The visual and haptic perception of natural object shape. *Perception & Psychophysics*, 66, 342-351.
- Oltman, P. K., Raskin, E., & Witkin, H. A. (1985). *Manuel du test des figures encastrées forme collective – GEFT*. Paris : Les Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Ostrovsky, Y., Meyers, E., Ganesh, S., Mathur, U., & Sinha, P. (2009). Visual parsing after recovery from blindness. *Psychological Science*, 20, 1484-1491.
- Pailhous, J. (1970). L'analyse des tâches complexes par les mouvements oculaires. *L'année psychologique*, 70, 487-504.
- Paillard, J. (1991). Motor and representational framing in space. In: J. Paillard (Ed.), *Brain and space* (pp. 163-182). Oxford University Press.
- Paivio, A. (1969). Mental imagery in associative learning and memory. *Psychological Review*, 76, 241-263.

- Paivio, A. (1971). *Imagery and verbal processes*. New York : Holt, Rinehart & Winston.
- Paivio, A. (1985). Cognitive and motivational functions of imagery in human performance. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences*, 10, 22-28.
- Parsons, L. M. (1987a). Imagined spatial transformations of one's hands and feet. *Cognitive Psychology*, 19, 178-241.
- Parsons, L. M. (1987b). Imagined spatial transformations of one's own body. *Journal of Experimental Psychology: General*, 116, 172-191.
- Parsons, L. M. (1994). Temporal and kinematic properties of motor behavior reflected in mentally simulated action. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20, 709-730.
- Parsons, L. M., Gabrieli, J. D., Phelps, E. A., & Gazzaniga, M. S. (1998). Cerebrally lateralized mental representations of hand shape and movement. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 18(16), 6539-48.
- Parsons, L. M. (2003). Superior parietal cortices and varieties of mental rotation. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 515-517.
- Parsons, L. M., Fox, P. T., Downs, J. H., Glass, T., Hirsch, T. B., Martin, C. C., Jerabek, P. A., & Lancaster, J. L. (1995). Use of implicit motor imagery for visual shape discrimination as revealed by PET. *Nature*, 375(6526), 54-8.
- Pascual-Leone, A., & Hamilton, R. H. (2001). The metamodal organization of the brain. *Prog. Brain Res.*, 134, 427-445.
- Pascual-Leone, A., Grafman, J., & Hallett, M. (1994). Modulation of cortical motor output maps during development of implicit and explicit knowledge. *Science*, 263, 1287-1289.

- Paz, S., Mayas, J., & Ballesteros, S. (2007). Haptic and visual working memory in young adults, older healthy adults and mild cognitive impairment adults. *World Haptics Proceedings (WHC'07)*, Tsukuba, Japan: IEEE Computer Society, 553-554.
- Pearson, D. G., Logie, R. H., & Gilhooly, K. J. (1999). Verbal representation and spatial manipulation during mental synthesis. *European Journal of Cognitive Psychology*, 11, 295-314.
- Perky, C. W. (1910). An Experimental study of imagination. *The American Journal of Psychology*, 21, 422-452.
- Peters, M., Laeng, B., Latham, K., & Jackson, M. (1995). A redrawn Vandenberg and Kuse Mental Rotations Test: Different versions and factors that affect performance. *Brain and Cognition*, 28, 39-58.
- Picard, D., Dacremont, C., Valentin, D., & Giboreau, A. s. (2003). Perceptual dimensions of tactile textures. *Acta Psychologica*, 114, 165-184.
- Pick, A. D., & Pick, H. L., Jr. (1966). A developmental study of tactual discrimination in blind and sighted children and adults. *Psychonomic Science*, 6, 367-368.
- Posner, M. I. (1967). Characteristics of visual and kinesthetic memory codes. *J Exp Psychol*, 75, 103-107.
- Prather, S. C., & Sathian, K. (2002). Mental rotation of tactile stimuli. *Cognitive Brain Research*, 14, 91-98.
- Prather, S. C., Votaw, J. R., & Sathian, K. (2004). Task-specific recruitment of dorsal and ventral visual areas during tactile perception. *Neuropsychologia*, 42, 1079-1087.
- Pylyshyn, Z. W. (1973). What the mind's eye tells the mind's brain : A critique of mental imagery. *Psychological Bulletin*, 80, 1-24.
- Pylyshyn, Z. W. (1981). The imagery debate: Analogue media versus tacit knowledge.

Psychological Review, 88, 16-45.

Pylyshyn, Z. W. (1984). *Computation and cognition*. Cambridge MA: MIT/Bradford

Pylyshyn, Z. W. (2003a). *Seeing and visualizing: It's not what you think*. Cambridge, MA US: MIT Press.

Pylyshyn, Z. W. (2003b). Return of the mental image: Are there really pictures in the brain? *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 113-118.

Rangel, M. L., Guimaraes-Silva, S., Laudares Marques, A., Riggio, L., Pereira, A., Lameira, A. P., Gawryszewski, L. G. (2010). Left-right judgment of haptic stimuli representing the human hand. *Psychology & Neuroscience*, 3, 135-140.

Rayner, K. (1995). Eye movements and cognitive processes. Review of perception and cognition: *Advances in eye movement research*. *American Journal of Psychology*, 66, 460-464.

Raz, N. (2000). Aging of the brain and its impact on cognitive performance: Integration of structural and functional findings. In F. I. M. Craik & T. A. Salthouse (Eds.), *The handbook of aging and cognition* (2nd ed.). (pp. 1-90). Mahwah, NJ US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.

Reales, J. M., & Ballesteros, S. (1999). Implicit and explicit memory for visual and haptic objects: Cross-modal priming depends on structural descriptions. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 25, 644-663.

Reed, C. L., Klatzky, R. L., & Halgren, E. (2005). What vs. where in touch: An fMRI study. *NeuroImage*, 25, 718-726.

Reed, C. L., Shoham, S., & Halgren, E. (2004). Neural Substrates of Tactile Object Recognition: An fMRI Study. *Human Brain Mapping*, 21, 236-246.

- Reuter-Lorenz, P. A., & Lustig, C. (2005). Brain aging : reorganizing discoveries about the aging mind. *Current opinion in Neurobiology*, 15, 245-251.
- Revesz, G. (1950). *Psychology and the art of the blind* (Trad. H.A.Wolff). London: Longmans Green.
- Richard, F., Vaz-Cerniglia, C., & Portalier, S. (2004). Evolution des procédures d'exploration haptique chez des sujets voyants, aveugles tardifs et aveugles précoces. *Revue européenne de psychologie appliquée*, 54, 227-236.
- Richter, W., Ugurbil, K., Georgopoulos, A. P., & S.-G. Kim (1997). Time-resolved fMRI of mental rotation. *NeuroReport*, 8, 3697-3702.
- Ridderinkhof, K. R., & Van der Molen, M. W. (1997). Mental resources, processing speed, and inhibitory control: a developmental perspective. *Biological Psychology*, 45, 241-261.
- Ridderinkhof, K. R., Span, M. M., & van der Molen, M. W. (2002). Perseverative behavior and adaptive control in older adults: Performance monitoring, rule induction, and set shifting. *Brain and Cognition*, 49, 382-401.
- Robert, M. I., & Chevrier, E. (2003). Does men's advantage in mental rotation persist when real three-dimensional objects are either felt or seen? *Memory & Cognition*, 31, 1136-1145.
- Robin, N., Dominique, L., Toussaint, L., Blandin, Y., Guillot, A., & Le Her, M. (2007). Effects of motor imagery training on service return accuracy in tennis: The role of imagery ability. *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, 5, 175-186.
- Rock, I. (1973). *Orientation and form*. New York, New York. Academic Press Inc.
- Rock, I., & Victor, J. (1964). Vision and touch: An experimentally created conflict between the two senses. *Science*, 143, 594-596.

- Röder, B., Rösler, F., & Hennighausen, E. (1997). Different cortical activation patterns in blind and sighted humans during encoding and transformation of haptic images. *Psychophysiology*, 34, 292-307.
- Roland, P. E., & Gulyás, B. (1994). Visual imagery and visual representation. *Trends in Neurosciences*, 17, 281-287.
- Roland, P. E., O'Sullivan, B., & Kawashima, R. (1998). Shape and roughness activate different somatosensory areas in the human brain. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 95, 3295–3300.
- Rosch, E., Mervis, C. B., Gray, W. D., Johnson, D. M., Boyes-Braem, P., Balota, D. A., et al. (2004). Basic Objects in Natural Categories. In *Cognitive psychology: Key readings*. (pp. 448-471). New York, NY US: Psychology Press.
- Rosch, E., Mervis, C. B., Gray, W., Johnson, D., & Boyes-Braem, P. (1976). Basic objects in natural categories. *Cognitive Psychology*, 3, 382-439.
- Rose, S. A., Feldman, J. F., Futterweit, L. R., & Jankowski, J. J. (1998). Continuity in tactual-visual cross-modal transfer: infancy to 11 years. *Dev Psychol*, 34, 435-440.
- Rösler, F., Röder, B., Heil, M., & Hennighausen, E. (1993). Topographic differences of slow event-related brain potentials in blind and sighted adult human subjects during haptic mental rotation. *Cognitive Brain Research*, 1, 145-159.
- Saimpont, A., Pozzo, T., & Papaxanthis, C. (2009). Aging affects the mental rotation of left and right hands. *PloS one*, 4, 1-8.
- Salvucci, D. D., & Anderson, J. R. (2001). Automated eye-movement protocol analysis. *Human-Computer Interaction*, 16, 39-86.
- Sathian, K., Zangaladze, A., Hoffman, J. M., & Grafton, S. T. (1997). Feeling with the mind's eye. *NeuroReport*, 8, 3877–3881.

- Sathian, K. (2005), Visual cortical activity during tactile perception in the sighted and the visually deprived. *Dev. Psychobiol.*, 46: 279–286.
- Sathian, K., & Lacey, S. (2007). Journeying beyond classical somatosensory cortex. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 61, 254-264.
- Sathian, K., & Prather, S. C. (2006). Cerebral cortical processing of tactile form: evidence from functional neuroimaging. In M. A. Heller & S. Ballesteros (Eds.), *Touch and blindness: psychology and neuroscience*. (pp. 157-170). Mahwah, NJ US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Sathian, K., Lacey, S., Stilla, R., Gibson, G. O., Deshpande, G., Hu, X., et al. (2011). Dual pathways for haptic and visual perception of spatial and texture information. *NeuroImage*, 57, 462-475.
- Schneider, G. E. (1969). Two visual systems. *Science*, 163, 895-902.
- Segal, S. J., & Fusella, V. (1971). Effect of images in six sense modalities on detection of visual signal from noise. *Psychonomic Science*, 24, 55-56.
- Sergent, J., Ohta, S., MacDonald, B. (1992). Functional neuroanatomy of face and object processing: a positron emission tomography study. *Brain*, 115,15-36.
- Servos, P., Lederman, S., Wilson, D., & Gati, J. (2001). fMRI-derived cortical maps for haptic shape, texture, and hardness. *Cognitive Brain Research*, 12, 307-313.
- Shepard, R. N. & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171, 701-703.
- Shepard, R. N. (1978). The mental image. *American Psychologist*, 33, 125-137.
- Shepard, R & Cooper, L. (1982). *Mental images and their transformations*. Cambridge, MA: MIT Press.

- Shepard, S., & Metzler, D. (1988). Mental rotation: Effects of dimensionality of objects and type of task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14, 3-11.
- Shiina, K., & Suzuki, K. (1999). Design of modified Mental Rotations Test and its error analysis. *Journal for Geometry and Graphics*, 3, 211-218.
- Shiina, K., Saito, T., & Suzuki, K. (1997). Analysis of problem solving process of a Mental Rotations Test – Performance in Shepard-Metzler Tasks. *Journal for Geometry and Graphics*, 1, 185-193.
- Simmons, R. W., & Locher, P. J. (1979). Role of extended perceptual experience upon haptic perception of nonrepresentational shapes. *Perceptual and Motor Skills*, 48, 987-991.
- Sinclair, R. J., Kuo, J. J., & Burton, H. (2000). Effects on discrimination performance of selective attention to tactile features. *Somatosens Mot Res*, 17, 145-157.
- Sirigu, A., Duhamel, J.-R., Cohen, L., Pillon, B., Dubois, B., & Agid, Y. (1996). The mental representation of hand movements after parietal cortex damage. *Science*, 273, 1564-1568.
- Sirigu, A., & Duhamel, J. R. (2001). Motor and visual imagery as two complementary but neurally dissociable mental processes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(7), 910-919.
- Skoura, X., Papaxanthis, C., Vinter, A., & Pozzo, T. (2005). Mentally represented motor actions in normal aging I. Age effects on the temporal features of overt and covert execution of actions. *Behavioural Brain Research*, 165, 229-239.
- Smith, L. B. (1981). Importance of the overall similarity of objects for adults' and children's classification. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7, 811-824.

- Smith, L. B. (1989). A model of perceptual classification in children and adults. *Psychological Review*, 96, 125-144.
- Spence, C., & Gallace, A. (2007). Recent developments in the study of tactile attention. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 61, 196-207.
- SR Research Ltd. (2002a). EyeLink script processor user manual. Mississauga, ON: SR Research Ltd.
- SR Research Ltd. (2002b). EyeLink data viewer user manual. Mississauga, ON: SR Research Ltd.
- Srinivas, K., Greene, A. J., & Easton, R. D. (1997). Implicit and explicit memory for haptically experienced two-dimensional patterns. *Psychological Science*, 8, 243-246.
- Stankov, L., Seizova-Cajić, T., & Roberts, R. D. (2001). Tactile and kinesthetic perceptual processes within the taxonomy of human cognitive abilities. *Intelligence*, 29, 1-29.
- Stoesz, M. R., Zhang, M., Weisser, V. D., Prather, S. C., Mao, H., & Sathian, K. (2003). Neural networks active during tactile form perception: Common and differential activity during macrospatial and microspatial tasks. *International Journal of Psychophysiology*, 50, 41-49.
- Streri, A. (2000). Les coordinations intermodales chez le bébé. In Y. Hatwell, A. Streri et E. Gentaz (Eds.), *Toucher pour connaître : Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle* (pp. 193-209). Paris Presses universitaires de France.
- Tagaris, G. A., Richter, W., Kim, S.-G., Pellizer, G., Andersen, P., Ugurbil, K., et al. (1998). Functional magnetic resonance imaging of mental rotation and memory scanning: A multidimensional scaling analysis of brain activation patterns. *Brain Research Reviews*, 26, 106-112.
- Thinus-Blanc, C., & Gaunet, F. (1997). Representation of Space in Blind Persons: Vision

as a Spatial Sense? *Psychological Bulletin*, 121, 20-42.

Thomas, N. J. T. (1999). Are theories of imagery theories of imagination? An active perception approach to conscious mental content. *Cognitive Science: A Multidisciplinary Journal*, 23, 207-245.

Tippet, L. (1992). The generation of visual images: A review of neuropsychological research and theory. *Psychological Bulletin*, 112, 415-432.

Tomasino, B., Toraldo, A., & Rumiati, R. I. (2003). Dissociation between the mental rotation of visual images and motor images in unilateral brain damaged patients. *Brain & Cognition*, 51, 368-371.

Tomasino, B., & Rumiati, R. I. (2004). Effects of strategies on mental rotation and hemispheric lateralization: Neuropsychological evidence. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16, 878-888.

Tomasino, B., Weiss, P. H., & Fink, G. R. (2010). To move or not to move: imperatives modulate action-related verb processing in the motor system. *Neuroscience*, 169, 246-258.

Tootell, R. B. H., Hadjikhani, N. K., Mendola, J. D., Marrett, S., & Dale, A. M. (1998). From retinotopy to recognition: fMRI in human visual cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 2, 174-183.

Toussaint, L., & Blandin, Y. (2010). On the role of imagery modalities on motor learning. *Journal of Sports Sciences*, 28, 497-504.

Toussaint, L., Caissie, A., & Blandin, Y. (2012). Does spatial ability depend on sensory-specific experience? *Journal of Cognitive Psychology*. doi: 10.1080/20445911.2011.641529.

Toussaint, L., & Meugnot, A. (2012). Short-term immobilization affects cognitive motor processes. *Journal of Experimental Psychology*.

- Toussaint, L., Robin, N., & Blandin, Y. (2010). On the content of sensorimotor representations after actual and motor imagery practice. *Motor Control*, 14, 159-175.
- Treisman, A., & Gormican, S. (1988). Feature analysis in early vision: Evidence from search asymmetries. *Psychological Review*, 95, 15-48.
- Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In: D. J. Ingle, M. A. Goodale, & R. J. W. Mansfield (Eds.). *Analysis of Visual Behavior* (549-586). Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Newell, K. M., Vaillancourt D. E., & Sosnoff, J.J. (2006). Aging, complexity and motor performance: healthy and disease states. In J.E. Birren & K.W. Schaie (Eds.), *Handbook of the psychology of aging* (6th Ed.) (p 163-182). Amsterdam: Elsevier.
- Vakil, E., Lifshitz, H., Tzuriel, D., Weiss, I., & Arzuwan, Y. (2011). Analogies solving by individuals with and without intellectual disability: Different cognitive patterns as indicated by eye movements. *Research in Developmental Disabilities*, 32, 846-856.
- Van Boven, R. W., Ingeholm, J. E., Beauchamp, M. S., Bickle, P. C., & Ungerleider, L. G. (2005). Tactile form and location processing in the human brain. *PNAS Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102, 12601-12605.
- van der Molen, M. W., & Ridderinkhof, K. R. (1998). The growing and aging brain: Life-span changes in brain and cognitive functioning. In: A. Demetriou, W. Doise & C. van Lieshout (Eds.), *Life span developmental psychology* (pp.35-99). New-York: Wiley.
- Vandenberg, S. G., & Kuse, A. R. (1978). Mental rotations, a group test of three-dimensional spatial visualization. *Perceptual and Motor Skills*, 47, 599-604.
- Vigneau, F., Caissie, A. F., & Bors, D. A. (2006). Eye-movement analysis demonstrates

strategic influences on intelligence. *Intelligence*, 34, 261-272.

Vigneau, F., Caissie, A.F., et Bors, D. (sous presse). L'hétérogénéité de configuration au Test de Rotation Mentale : Facteur de différences individuelles ? XIXième Journées Internationales de Psychologie Différentielle : Psychologie différentielle et champs de recherche connexe : Influence et Perspectives.

Vingerhoets, G., de Lange, F. P., Vandemaele, P., Deblaere, K., & Achten, E. (2002). Motor imagery in mental rotation: an fMRI study. *Neuroimage*, 17(3), 1623–1633.

Viviani, P. (1990). Eye movements in visual search: cognitive, perceptual and motor control aspects. *Reviews of oculomotor research*, 4, 353-393.

Volcic, R., Wijntjes, M. W. A., & Kappers, A. M. L. (2009). Haptic mental rotation revisited: Multiple reference frame dependence. *Acta Psychologica*, 130, 251-259.

Volcic, R., Wijntjes, M. W. A., Kool, E. C., & Kappers, A. M. L. (2010). Cross-modal visuo-haptic mental rotation: Comparing objects between senses. *Experimental Brain Research*, 203, 621-627.

von Senden, M. (1960). *Space and sight*. New York, NY US: Methuen.

Voyer, D., & Hou, J. (2006). Type of items and the magnitude of gender differences on the Mental Rotations Test. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 60, 91-100.

Voyer, D., Rodgers, M. A., & McCormick, P. A. (2004). Timing conditions and the magnitude of gender differences on the Mental Rotations Test. *Memory & Cognition*, 32, 72-82.

Wallon, H. (1956). Importance du mouvement dans le développement psychologique de l'Enfant. *Enfance*, 9, 1-4.

Welford, A. T. (1958). *Ageing and human skill*. Oxford England: Oxford Univer. Press.

- Welsch, R. E. (1972). A modification of the Newman-Keuls procedure for multiple comparisons. Working paper 612-72, Sloan School of Management, M.I.T. Boston, MA.
- West, R. L. (1996). An application of prefrontal cortex function theory to cognitive aging. *Psychological Bulletin*, 120, 272-292.
- West, R., Craik, F.I.M. (1999). Age-related decline in prospective memory: The roles of cue accessibility and cue retrievability. *Psychol Aging*, 14, 264–272.
- Wexler, M., Kosslyn, S. M., & Berthoz, A. (1998). Motor processes in mental rotation. *Cognition*, 68, 77-94.
- Wild, K., Howieson, D., Webbe, F., Seelye, A., & Kaye, J. (2008). Status of computerized cognitive testing in aging: A systematic review. *Alzheimer's & Dementia*, 4, 428-437.
- Winer, B. J., Brown, R., & Michels, K.M., (1991). *Statistical principles in experimental design*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill.
- Witkin, H. A., Oltman, P. K., Raskin, E., & Karp, S. E. (1971). *A manual for the embedded figures test*. Palo Alto: Consulting Psychologists Press.
- Woods, A. T., & Newell, F. N. (2004). Visual, haptic and cross-modal recognition of objects and scenes. *Journal of Physiology (Paris)*, 98, 147-59.
- Woods, A. T., O'Modhrain, S., & Newell, F. N. (2004). The effect of temporal delay and spatial differences on cross-modal object recognition. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 4, 260-269.
- Wraga, M., Shephard, J. M., Church, J. A., Inati, S., & Kosslyn, S. M. (2005). Imagined rotations of self versus objects: An fMRI study. *Neuropsychologia*, 43, 1351-1361.
- Wraga, M., Swaby, M., & Flynn, C. M. (2008). Passive tactile feedback facilitates mental

- rotation of handheld objects. *Memory & Cognition*, 36, 271-281.
- Wraga, M., Thompson, W. L., Alpert, N. M., & Kosslyn, S. M. (2003). Implicit transfer of motor strategies in mental rotation. *Brain and Cognition*, 52, 135-143.
- Willingham, D. B. (1997). Implicit and explicit memory do not differ in flexibility: Comment on Dienes and Berry (1997). *Psychonomic Bulletin and Review*, 4, 587-591.
- Willingham, D. B. (1999). Implicit motor sequence learning is not purely perceptual. *Memory and Cognition*, 27, 561-572.
- Wright, R., Thompson, W. L., Ganis, G., Newcombe, N. S., & Kosslyn, S. M. (2008). Training generalized spatial skills. *Psychonomic Bulletin and Review*, 15, 763-771.
- Yarbus, A. L. (1967). *Eye movements and vision* (B. Haigh, Trad.). New York: Plenum Press.
- Zacks, J. M., Ollinger, J. M., Sheridan, M. A., & Tversky, B. (2002). A parametric study of mental spatial transformations of bodies. *NeuroImage*, 16, 857-72.
- Zacks, J. M. (2008). Neuroimaging studies of mental rotation: A meta-analysis and review. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20, 1-19.
- Zacks, J. M., & Michelon, P. (2005). Transformations of Visuospatial Images. *Behavioral and Cognitive Neuroscience Reviews*, 4, 96-118.
- Zanette, G., Tinazzi, P., Bonato, C., di Summa, A., Manganotti, P., Polo, A., & Fiaschi, A. (1997). Reversible changes of motor cortical outputs following immobilization of the upper limb. *Electroencephalogr Clin Neurophysiology*, 105(4), 269-279.
- Zangaladze, A., Epstein, C. M., Grafton, S. T., & Sathian, K. (1999). Involvement of visual cortex in tactile discrimination of orientation. *Nature*, 401, 587-590.
- Zhang, M., Weisser, V. D., Stilla, R., Prather, S. C., & Sathian, K. (2004). Multisensory cortical processing of object shape and its relation to mental imagery. *Cognitive*,

Affective & Behavioral Neuroscience, 4, 251-259.

Zimler, J., & Keenan, J. M. (1983). Imagery in the congenitally blind: How visual are visual images? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 9, 269-282.

Zuidhoek, S., Kappers, A., van der Lubbe, R. & Postma, A. (2003). Delay improves performance on a haptic spatial matching task. *Experimental Brain Research*, 149, 320-330.

– INDEX DES FIGURES –

INDEX DES FIGURES

PREMIERE PARTIE : CADRE THEORIQUE

- Figure 1.** Représentation interne de la lettre « J » (a), renversement de la lettre « J » (b), et rotation antihoraire vers la position usuelle, en fin de parcours mental (c). Représentations « D » et « J » associées en une image mentale unifiée d'un « parapluie » (d) (inspiré du travail par Barquero & Logie, 1999 ; Pearson et al., 1999). 10
- Figure 2.** Exemple d'une paire d'objets identiques utilisée dans l'étude de Shepard et Metzler, 1971 (disparité angulaire de 170°) 19
- Figure 3.** Procédures d'exploration tactile : A - enveloppement ; B – opposition pouce-index C - suivi des contours. 25
- Figure 4.** Procédure d'exploration visuelle : fixations (points blancs) et saccades (lignes)..... 27
- Figure 5.** Zones corticales impliquées dans l'exploration tactile de formes (d'après James et al., 2007). Les zones IPS et LOTv participent activement à la reconnaissance des propriétés géométriques. Elles seraient des zones bimodales tactile-visuelle. Les zones SI, SII, Insula antérieur, et Gyrus précentral, participent à la reconnaissance des propriétés matérielles. Une dissociation des voies consacrées respectivement à la reconnaissance des propriétés géométriques et des propriétés matérielles aurait été estimée à la hauteur du Gyrus post-central (SI), selon la hiérarchie structurale tactile. Le cortex pariétal aurait été impliqué dans des tâches d'aptitudes spatiales nécessitant l'activation et la manipulation d'images mentales dans les deux modalités sensorielles. 33
- Figure 6.** Reproduction des stimuli utilisés par Sathian et al., 1997. A) Vue transversale du stimulus appliqué sur la peau de l'index droit des participants avec différentes possibilités de rotation B) verticale et C) horizontale.....35
- Figure 7.** Stimuli identiques tirés de Rösler et al., 1993. Les stimuli illustrés ici présentent une disparité angulaire de 60°36
- Figure 8.** Exemples d'items du MRT (d'après Vigneau et al., 2010). Pour chaque item, le participant doit trouver, parmi quatre choix de réponse à droite, deux objets identiques au modèle, situé à gauche. Les items A et B présentent une occlusion visuelle (choix 3 et 2, respectivement), l'item C est sans occlusion visuelle ; les items A et B sont des items

miroir (les mauvaises réponses sont des reproductions miroir du modèle), l'item C est un item structural (les mauvaises réponses sont autre chose que l'image miroir du modèle) ; les items A et B sont homogènes (les segments des extrémités terminales d'objets sont de longueur égale : 3 cubes), l'item C est hétérogène (les segments des extrémités terminales d'objets sont inégaux : 3 cubes constituent l'extrémité du haut vs. 2 cubes constituent l'extrémité du bas).....40

Figure 9. Fonction linéaire entre les temps de réponse (TR) et le degré de disparité angulaire (α). 44

DEUXIEME PARTIE : PARTIE EXPERIMENTALE

Figure 10. Illustration de deux items visuels du MRT. Chaque item est composé d'un modèle (A) et de quatre choix de réponse (B, C, D, E). Les réponses correctes de l'item 3 sont C et E ; les distracteurs à configuration structurale différente sont B et D. Les réponses correctes de l'item 12 sont C et D ; les distracteurs à configurations miroir sont B et E50

Figure 11. Illustration du contexte de la tâche visuelle avec mesure des mouvements oculaires. Les participants encerclaient sur écran leurs deux choix de réponse en utilisant un stylo digital, avant de cocher une case en bas à droite de l'écran pour passer à l'écran intermédiaire de calibration de mesure. La calibration inter-item consistait en un exercice simple de fixation d'un point central à l'écran. L'expérimentateur était assis deux mètres derrière les participants face à l'ordinateur maître Eyelink II® (©2002a). Il assurait la calibration et l'amorçage des items subséquents.....51

Figure 12. Item 12 de la tâche tactile, sur planche (65 cm x 13 cm). Chaque item est composé d'un modèle (A) et de quatre choix de réponse (B, C, D, E). Les réponses correctes de l'item 12 sont C et D ; les distracteurs à configuration miroir ou symétrique sont B et E.....51

Figure 13. Dispositif expérimental de la tâche tactile. 3A : Une boîte (68 cm x 68 cm x 30 cm) munie de cases d'entrée main/objets à l'avant et d'une case d'entrée/sortie des items sur le côté droit. Les participants étaient assis devant le dispositif et l'expérimentateur était positionné derrière (68 cm x 68 cm). 3B : Contexte de tâche. Avec la main droite, les participants touchaient les objets. Les boutons de réponse activaient les lumières correspondant aux réponses émises. 3C : Plan du dispositif expérimental, vue de haut. Caméra vidéo (a), lumières (b), boutons de réponse (c), écran opaque (d). L'expérimentateur faisait glisser l'item le long de rails, par la case d'entrée, avant de l'immobiliser en position pour le traitement tactile (e).....52

Figure 14. Taux de changement moyens des scores de précision (avec erreurs types), par modalité sensorielle, par condition (intramodale vs. intermodale). Rappel : un TC négatif traduit une amélioration du score de précision de la session 1 à la session 2. 58

Figure 15. Temps de réponse (secondes, avec erreurs types) aux sessions 1(a) et 2(b), par modalité sensorielle et par condition (intramodale vs. intermodale). 59

Figure 16. Taux de changement moyens des temps de réponse (avec erreurs types), par modalité de tâche, par condition (intramodale vs. intermodale). Rappel : un TC positif traduit une amélioration de la performance, c'est-à-dire une diminution des temps de réponse de la session 1 à la session 2. 60

Figure 17. Illustration d'un item du Test des Figures Encadrées (EFT). 66

Figure 18. Pourcentages de réponses correctes (avec erreurs types) par facteurs de difficulté a) Occlusion, b) Distracteurs, c) Configurations, par caractéristiques d'items et par modalité sensorielle. *=différences significatives entre caractéristiques d'items 71

Figure 19. Temps moyens de réponses correctes (avec erreurs types) par facteurs de difficulté a) Occlusion, b) Distracteurs, c) Configurations, par caractéristiques d'items et par modalité sensorielle. *=différences significatives entre caractéristiques d'items. 72

Figure 20. TC des scores de précision (avec écarts-types) ; Modèle Distracteurs. Taux de changement moyens par caractéristiques d'items, par modalité, et par condition (intermodale : V-T et T-V ; intramodale : T-T et V-V). Rappel : un TC négatif traduit une amélioration du score de précision de la session 1 à la session 2 80

Figure 21. TC (%) des scores de précision (avec écarts-types) ; Modèle Occlusion-Configuration. Taux de changement moyens par caractéristiques d'items, par modalité et par condition (intermodale : V-T et T-V ; intramodale : T-T et V-V). Rappel : un TC négatif traduit une amélioration du score de précision de la session 1 à la session 2 81

Figure 22. TC (%) des temps de réponses (avec écarts-types) ; Modèle Distracteurs. Taux de changement par caractéristiques d'items, par modalité de tâche et par condition (intermodale : V-T et T-V ; intramodale : T-T et V-V). Rappel : un TC positif traduit une amélioration de la performance, c'est-à-dire une diminution des temps de réponse de la session 1 à la session 2 83

Figure 23. TC (%) des temps de réponses (avec écarts-types) ; Modèle Occlusion-Configuration. Taux de changement par caractéristiques d'items, par modalité de tâche et par condition (intermodale : V-T et T-V ; intramodale : T-T et V-V). Rappel : un TC positif traduit une

amélioration de la performance, c'est-à-dire une diminution des temps de réponse de la session 1 à la session 2 84

Figure 24. Modèles utilisés pour la construction de paires identiques et différentes (miroir)..... 92

Figure 25. a) Illustration d'une planche identique (40 cm x 20 cm) avec modèle fixe à gauche et objet de comparaison à droite (15 cm d'écart). b) Vue de dessous d'une planche avec système de rotation de l'objet de comparaison sur sept positions angulaires possibles (0° ; 30° ; 60° ; 90° ; 120° ; 150° ; 180°) 93

Figure 26. Illustration du dispositif expérimental et de l'espace de travail pour les deux conditions sensorielles. (i) Système de rails pour la préparation et le glissement des paires d'objets en position d'administration. (ii) Ecran entre l'expérimentateur et le participant. (iii) Espace de travail. (iv) Position des paires durant la tâche tactile et la tâche visuelle. (v) Caméra vidéo pour filmer la main droite sur les objets. (vi) Porte mécanique d'entrée visuelle aux paires d'objets. (vii) Boîtier de réponse avec souris pour la tâche visuelle. (viii) Ecran ©Tobii 120X pour la mesure des mouvements oculaires. (ix) Croix de fixation visuelle, inter-item. (x) Ecran d'occlusion visuelle durant la tâche tactile (les participants passaient leur bras droit dans une case d'entrée aux paires d'objets en bas d'écran d'occlusion). (xi) Boîtier de réponse, avec touches de lumière pour la tâche tactile. (xii) Appuie coude. (xiii) Lumières signalant une réponse et le changement de paires d'objets durant la tâche tactile 95

Figure 27. Pourcentages de réponses correctes (avec erreurs types) par modalité de tâche, par disparités angulaires, à la session 1 100

Figure 28. Pourcentage de réponses correctes (avec erreurs types) par condition de changement, par modalité de tâche, à la session 2 100

Figure 29. a) Taux de changement des pourcentages de réponses correctes (avec erreurs types) par modalité, par condition ; b) Taux de changement des pourcentages de réponses correctes (avec erreurs types), par modalité et par disparités angulaires. Rappel : un TC négatif traduit une amélioration de la précision de la session 1 à la session 2 101-102

Figure 30. Temps de réponses (avec erreurs types) par modalité et par disparités angulaires : a) à la session 1 et b) à la session 2 103

Figure 31. Taux de changement (en %, avec erreurs types) des temps de réponse par condition et par modalité. Rappel : un TC positif traduit une amélioration de la performance, c'est-à-dire une diminution des temps de réponse de la session 1 à la session 2. 104

Figure 32. a) Intercepts et pentes exprimés par droites linéaires, par modalité de tâche, par condition de changement, par disparités angulaires, à la session 1 et à la b) session 2..... 105

Figure 33. a) Taux de changement sur les intercepts (avec erreurs types) par modalité de tâche, par condition de changement ; b) Taux de changement sur les pentes (avec erreurs types) par modalité de tâche, par condition de changement. Rappel : un TC positif traduit une diminution des temps d'encodage et de programmation des réponses (intercepts) et de la vitesse de rotation mentale (pente)..... 106

Figure 34. Calcul et illustration de la variable stratégique (1) PTM : proportions des temps d'inspection visuels et tactiles sur le modèle, par paires d'objets 112

Figure 35. Calcul et illustration de la variable stratégique (2) NCs : nombre de comparaisons par seconde, visuelles et tactiles, entre modèles et objets de comparaison, par paires d'objets 112

Figure 36. Calcul et illustration de la variable stratégique (3) NFHs : nombre total de fixations oculaires sur le haut des objets, par seconde, par paires d'objets 112

Figure 37. Proportion des temps d'inspection du modèle (PTM, avec erreurs types) à la session 1, par modalités et par disparités angulaires 114

Figure 38. Proportion des temps d'inspection du modèle (PTM, avec erreurs types) à la session 2, par modalités et par disparités angulaires 115

Figure 39. Nombre de comparaisons standardisé entre le modèle et l'objet de comparaison (NCs, avec erreurs types) à la session 1, par groupes et par disparités angulaires 116

Figure 40. Nombre de comparaisons standardisé entre le modèle et l'objet de comparaison (NCs, avec erreurs types) à la session 2, par groupes et par disparités angulaires 117

Figure 41. Dessin d'une main désorientée dans le plan (75°, rotation vers la gauche) par rapport à la position verticale (d'après Parsons, 1987). Dans une tâche de latéralité manuelle (rotation mentale motrice), les participants décident s'il s'agit d'une main droite ou d'une main gauche.. 129

- Figure 42.** Illustration de a) paires de mains identiques/différentes et de b) paires d'objets identiques/différents. Le modèle est à gauche et le stimulus de comparaison est à droite, à 120° de disparité angulaire. La comparaison nécessite une rotation mentale pour superposer le stimulus de droite sur le modèle de gauche (ex. A). Quatre modèles différents ont été créés par type de tâche, ainsi que leurs répliques parfaites (ex. A), et leurs répliques inversées ou miroir (ex. B)..... 140
- Figure 43.** Illustration du dispositif lors de la phase expérimentale correspondant aux stimuli de "main" (photo de gauche) et "objet" (photo de droite). Les index du participant (mains gauche et droite) reposent sur les touches de réponses du clavier e-prime..... 141
- Figure 44.** Pourcentages de réponses correctes (avec erreurs types) par Tâche (mains, objets) et Disparités angulaires (faibles : 20°-60°, moyennes : 80°-120°, élevées : 140°-180°) 144
- Figure 45.** Pourcentages de réponses correctes (avec erreurs types) par Tâche (mains, objets), Groupe (âgés, jeunes) et Ordre (M-O, O-M)..... 145
- Figure 46.** Temps de réponses (avec erreurs types) par Tâche (mains, objets), Disparités angulaires (faibles : 20°-60°, moyennes : 80°-120°, élevées : 140°-180°) et Groupe (âgés, jeunes)..... 146
- Figure 47.** Valeurs d'intercepts (avec erreurs types) par Tâche (mains, objets) et par Groupe (âgés, jeunes)..... 147
- Figure 48.** Valeurs de pentes (avec erreurs types) par Tâche (mains, objets), Groupe (âgés, jeunes), et Ordre (M-O, O-M)..... 148
- Figure 49.** Prédiction des résultats sur les transferts de pente entre imagerie motrice et imagerie visuelle, pour une étude prévue ultérieurement intégrant des groupes contrôles O-O (et M-M) . 151
- Figure 50.** Illustration d'un modèle explicatif des performances intramodales et intermodales en rotation mentale avec objets tridimensionnels S-M (Shepard & Metzler, 1971). Conditions intramodales : Session 1 : stratégies spécifiques **Tactiles**-spatiales IM ou **Visuelles**-visuelles IM— Session 2 : stratégies spécifiques **Tactiles**-spatiales IM ou **Visuelles**-visuelles IM. Conditions intermodales : Session 1 : stratégies spécifiques **Tactiles**-spatiales IM ou **Visuelles**-visuelles IM— Session 2 : stratégies interférentes **Tactiles**-spatiales-Visual IM ou **Visual**-spatial im. L'influence tactile sur le traitement visuel est limitée, le transfert dans ce sens est plutôt fragilisé. L'influence visuelle sur le traitement tactile est importante, pouvant néanmoins interférer avec le traitement

tactile dans le transfert. Les transferts intramodaux sont importants, pouvant néanmoins dépendre de stratégies spécifiques à la modalité sensorielle utilisée..... 162

Figure 51. Stimuli développés pour des études de la rotation mentale tactile, et les transferts intermodaux. a) Tâche de discrimination de diagrammes désorientés avec largeurs de traits variables. b) Tâche de discrimination de stimuli deux-dimensionnels similaires aux stimuli utilisés dans l'étude de Volcic et al., 2010..... 169

– INDEX DES TABLEAUX –

INDEX DES TABLEAUX

PREMIERE PARTIE : CADRE THEORIQUE

Tableau 1 : Schéma des différentes conditions de transfert et résultats attendus18

Tableau 2. Catégorisation des caractéristiques d'items du MRT selon Voyer et Hou (2006), Caissie et al. (2009), pour les items utilisés dans cette étude42

DEUXIEME PARTIE : PARTIE EXPERIMENTALE

Tableau 3. Récapitulatif des groupes expérimentaux (N = 93 ; Exp. 1a).....53

Tableau 4. Pourcentages moyens de réponses correctes (avec écarts-types) à la session 1 et à la session 2, et les taux de changement moyens (avec écarts-types), par groupes.....57

Tableau 5. Pourcentages de réponses correctes par items et temps de réponse moyens (avec écarts-types) par items à la session 1, sur les versions visuelle et tactile du Test des Rotations Mentales..69

Tableau 6. Scores moyens par groupe au EFT, avec écarts-types (ET), asymétries (As.) et aplatissements (Ap.).....69

Tableau 7. Pourcentage de réponses correctes (avec écarts-types) à la session 1 et à la session 2, taux de changement (TC) (avec écarts-types), par groupes et par caractéristiques d'items. a) Modèle Distracteurs ; b) Modèle Occlusion-Configuration.....82

Tableau 8 : Schéma des différentes conditions de transfert et résultats obtenus dans les expériences - 1a et 1c - avec le Test des Rotations Mentales89

Tableau 9. Récapitulatif des groupes expérimentaux (N = 51 ; Exp. 2a).....96

Tableau 10. Récapitulatif des groupes expérimentaux (N = 51 ; Exp. 2b).111

Tableau 11. Taux de changement moyens de la première à la deuxième session (avec écarts-types), par groupes, par variable stratégique (brute et standard)118

Tableau 12 : Schéma des différentes conditions de transfert et résultats obtenus à la deuxième expérience (2a et 2b) avec une tâche de rotation mentale élémentaire122

Tableau 13. Récapitulatif des groupes expérimentaux (N = 117 ; Etude 2)140

RESUME

Ce travail de thèse repose sur la combinaison de deux paradigmes de recherche en psychologie cognitive : la rotation mentale et les transferts intermodaux/inter-tâches. Dans notre première étude (Expériences 1a, 1b, 1c, 2a, et 2b), l'objectif était d'évaluer la dépendance/indépendance des traitements visuel et tactile, lors de tâches de rotation mentale : le Test des Rotations Mentales (Vandenberg & Kuse, 1978) et une tâche élémentaire de rotation mentale (Shepard & Metzler, 1971). En utilisant un plan expérimental intra-sujet, nous avons comparé quatre conditions expérimentales incluant des apprentissages intramodaux : 1. Visuel-Visuel ; 2. Tactile-Tactile, et des transferts intermodaux : 3. Visuel-Tactile ; 4. Tactile-Visuel. Les participants ont ainsi réalisé deux tâches successives dans des conditions sensorielles similaires ou différentes (session 1 et session 2). Nos résultats révèlent que la rotation mentale peut dépendre de processus de traitement des représentations spécifiques à la modalité sensorielle utilisée. Les informations découlant d'une expérience visuelle sont réutilisables dans la condition tactile, alors qu'à l'inverse, nous n'avons observé que très peu de transferts tactiles en condition visuelle. Les traitements visuels et tactiles, sur des objets tridimensionnels complexes, permettent ainsi le développement de stratégies d'imagerie mentale spécifiques (Visuel-Visuel-IM vs. Tactile-Spatial-IM), découlant de différents modes de traitements perceptifs (visuel-global vs. tactile-spatial). Dans notre deuxième étude, nous avons évalué la dépendance/indépendance stratégique lors de tâches d'imagerie visuelle et d'imagerie motrice, en utilisant un plan expérimental intra-sujet. Nous avons aussi étudié les effets liés au vieillissement normal. Nos résultats ont démontré que les personnes âgées obtiennent de moins bonnes performances que les personnes jeunes. Chez les jeunes, nous avons notamment démontré l'impossibilité de transferts de traitement entre les deux tâches. Les personnes âgées, quant-à-elles, démontrent une perturbation de la vitesse de rotation mentale visuelle lorsque la tâche motrice précède la tâche visuelle, avec une augmentation de la précision visuelle. Ces résultats suggèrent chez les personnes âgées une forme d'interférence contextuelle due à l'expérience préalable, le traitement d'une stratégie différente (motrice) pouvant être transféré dans un nouveau contexte (visuel).

Mots-clés : Rotation mentale ; Imagerie visuelle ; Imagerie tactile ; Imagerie motrice ; Traitements visuels et tactiles ; Apprentissages intramodaux ; Transferts intermodaux ; Transferts inter-tâches ; Vieillissement normal.

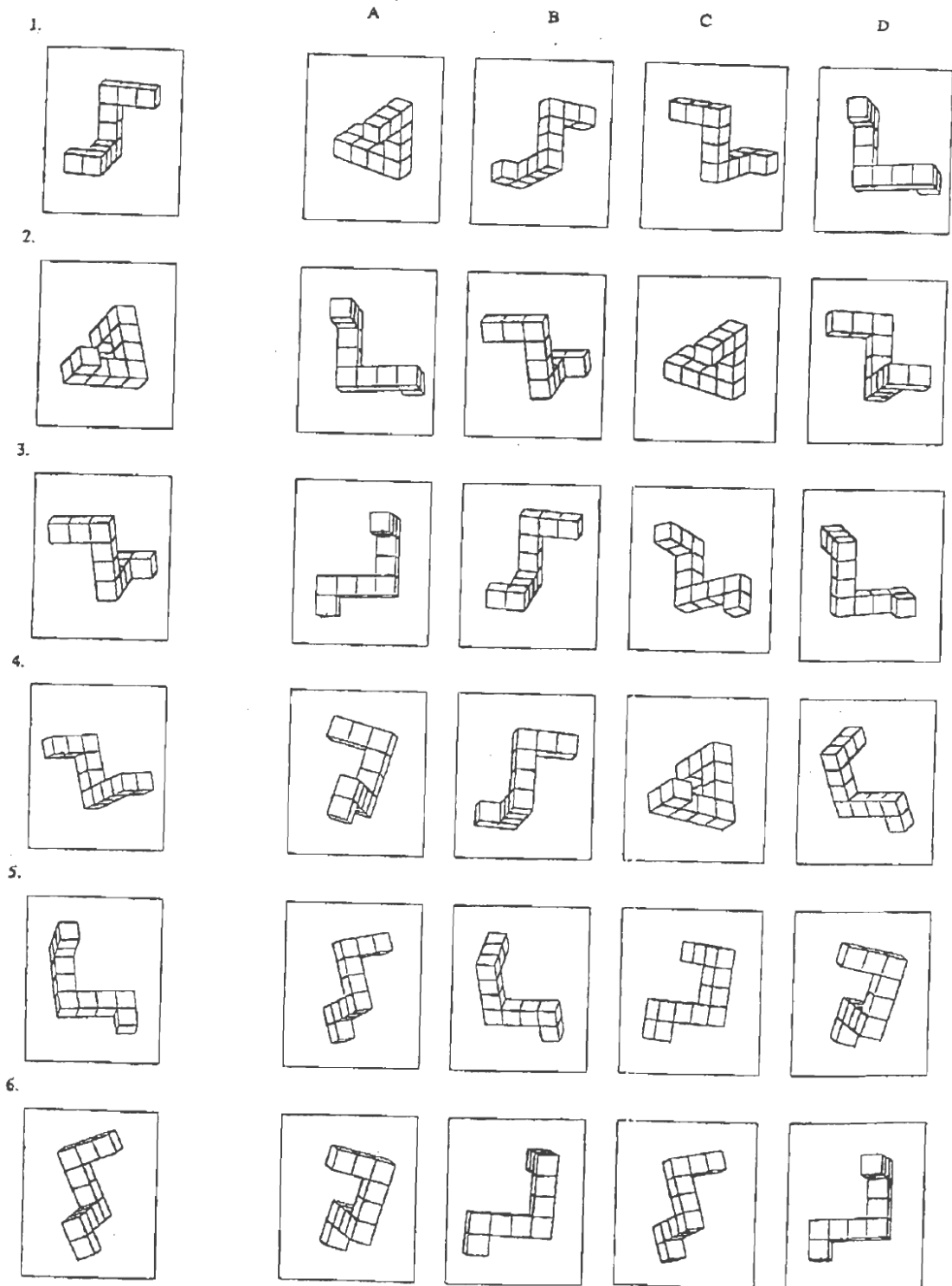
ABSTRACT

The work presented in this dissertation is based on the combination of two research paradigms in the field of cognitive psychology: mental rotation and intermodal/inter-task transfer of learning. In our first study (Experiments 1a, 1b, 1c, 2a, and 2b), the objective was to evaluate the processing dependence/independence of visual and tactile information during two mental rotation tasks: the Mental Rotation Test (Vandenberg & Kuse, 1978) and an object mental rotation task (Shepard & Metzler, 1971). Using an intra-subject experimental design, we compared four experimental conditions including intramodal learning: 1. Visual-Visual ; 2. Tactile-Tactile, and intermodal transfer: 3. Visual-Tactile ; 4. Tactile-Visual. Subjects performed two successive tasks in similar perceptual conditions or different perceptual conditions (session 1 and session 2). Our results revealed that mental rotation can depend on treatment processes of mental representations specific to the perceptual modality being used. The information derived from visual prior experience can be used in the tactile condition, whereas we observed few significant tactile transfers in the visual condition. Visual and tactile treatments on complex three-dimensional objects thus permit specific mental imagery strategies (Visual-Visual-IM vs. Tactile-Spatial-IM), derived from different perceptual exploration strategies (visual-global vs. tactile-spatial). In our second study, we evaluated the strategic dependence/independence on tasks of visual imagery and motor imagery, using an intra-subject experimental design. We also studied the effects of normal aging. Our results demonstrated that younger subjects outperform older subjects in both mental imagery tasks. Results also showed the absence of transfer of treatment from one task to the other when we consider younger subjects' performances. For older subjects, prior motor imagery experience disrupts visual mental rotation speed, while favoring better visual imagery accuracy. These results suggest contextual interference in normal aging due to prior experience: the treatment of a different strategy (motor) can be transferred in a new context of mental rotation (visual).

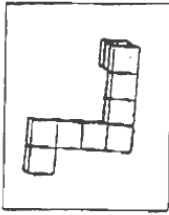
Key-words : Mental rotation ; Visual imagery ; Tactile imagery ; Motor imagery ; Visual and tactile processing ; Intramodal learning ; Intermodal transfer ; Inter-task transfer ; Normal aging.

– ANNEXES –

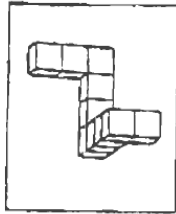
« Illustrations des 14 items visuels du Test des Rotations Mentales (Vandenberg & Kuse, 1978) »



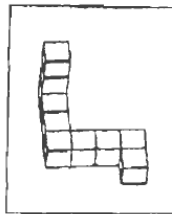
7.



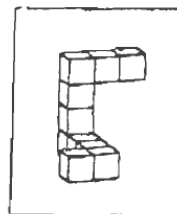
A



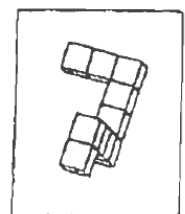
B



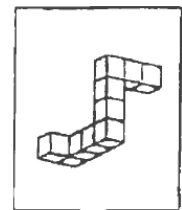
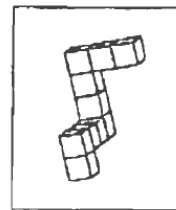
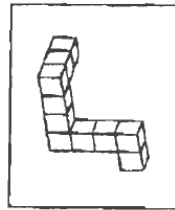
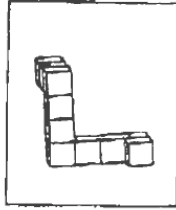
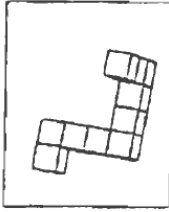
C



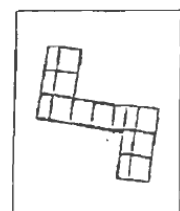
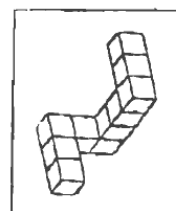
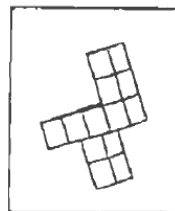
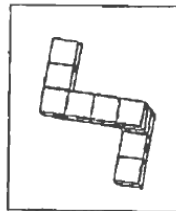
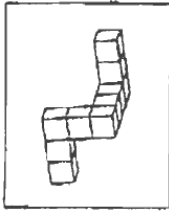
D



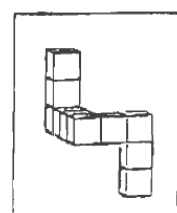
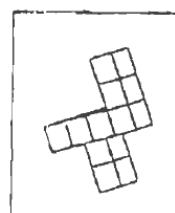
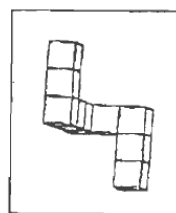
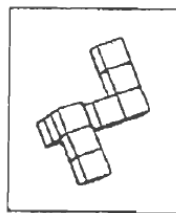
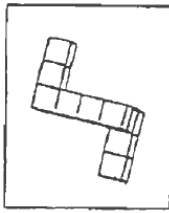
8.



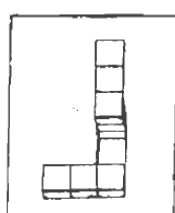
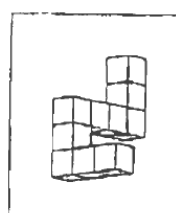
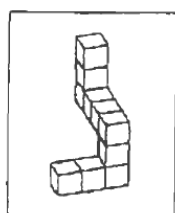
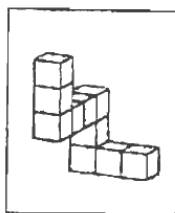
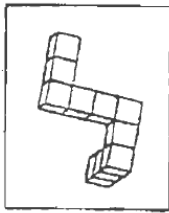
9.



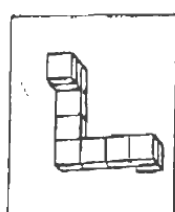
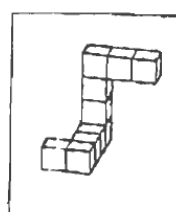
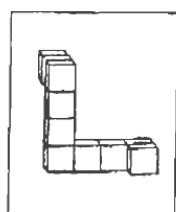
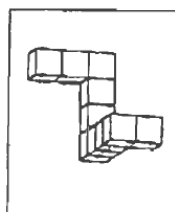
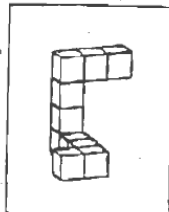
10.



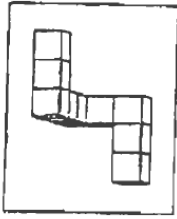
11.



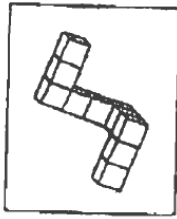
12.



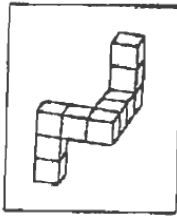
13.



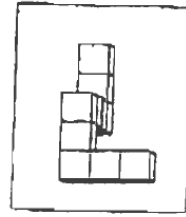
A



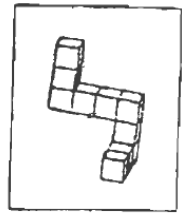
B



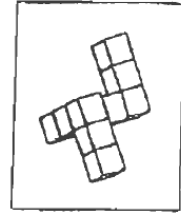
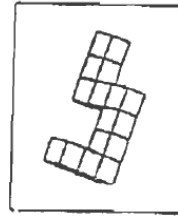
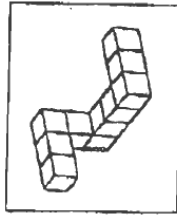
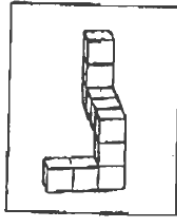
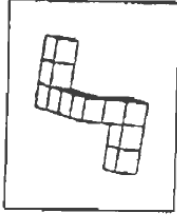
C



D



14.



Toussaint, L., Caissie, A. F., & Blandin, Y. (2012). Does spatial ability depend on sensory-specific experience? *Journal of Cognitive Psychology*. doi: 10.1080/20445911.2011.641529.

JOURNAL OF COGNITIVE PSYCHOLOGY, 2012, 24 (4), 387–394

 Psychology Press
Taylor & Francis Group

Does mental rotation ability depend on sensory-specific experience?

Lucette Toussaint, André F. Caissie, and Yannick Blandin

Centre de Recherches sur la Cognition et l'Apprentissage, Université de Poitiers, Poitiers, France

No study has investigated the link between vision and touch with respect to spatial abilities using a within-subjects design. With this design, we compared participants' tactile and visual mental rotation abilities, as measured by the Mental Rotations Test (Vandenberg & Kuse, 1978). Participants in four groups completed two consecutive sessions under no-switch (visual-visual or tactile-tactile) or switch conditions (visual-tactile or tactile-visual) to determine whether mental rotation abilities assessed in Session 2 depend on previous sensory-specific experiences (Session 1). Analysis of response accuracy revealed that all groups improved their performance in Session 2. Analysis of response time showed an improvement in visual and tactile performance during Session 2 for participants who first performed the task with the same modality. No effect of task repetition appeared for participants who performed in two different sensory conditions. These results reveal that mental rotation ability partly depends on sensory-specific conditions and that ability developed in a sensory-specific condition does not necessarily transfer to another sensory condition.

Keywords: Mental rotation; Touch; Vision.

An aspect of human cognition is our ability to mentally manipulate objects. We can readily imagine our automobile in a particular setting and from multiple perspectives (front, back, side). This mental processing is important for some spatial reasoning tasks and involves mental spatial abilities that are commonly evaluated using the Mental Rotations Test (MRT; Vandenberg & Kuse, 1978). The MRT is an adaptation of the mental rotation task developed by Shepard and Metzler (1971). Shepard and Metzler used meaningless geometrical objects made up of assembled cubes. With this paradigm, they demonstrated that participants mentally rotated objects to decide whether two objects are identical or not (i.e., mirror images). Because

participants would have a 50% chance of correctly solving the task based on chance alone, Vandenberg and Kuse (1978) increased the difficulty level of Shepard and Metzler's task by reducing the possibility of guessing the correct answer. In their Mental Rotations Test (MRT), Vandenberg and Kuse used objects that were similar to those in Shepard and Metzler's task, but participants were presented with one target object and four choice figures (two rotated reproductions of the target and two distractors with either mirror presentation or structural differences). Participants had to identify the two rotated reproductions among the four possible response choices resulting in a 17% chance to answer correctly.

Correspondence should be addressed to Lucette Toussaint, CeRCA, CNRS/UMR 6234, 5 rue Théodore Lefebvre, 86000, Poitiers, France. E-mail: lucette.toussaint@univ-poitiers.fr

LT and AFC contributed equally to this work. The authors would like to thank the two anonymous reviewers for their helpful comments.

© 2012 Psychology Press, an imprint of the Taylor & Francis Group, an Informa business
<http://www.psypress.com/ecp> <http://dx.doi.org/10.1080/20445911.2011.641529>

The literature on mental rotation of visually presented objects is abundant (e.g., Kosslyn, DiGirolamo, Thompson, & Alpert, 1998; Parsons, 1987; Shepard & Metzler, 1971), yet our ability to mentally manipulate objects does not depend solely on visual information. Mental manipulation of objects can also be performed following tactile exploration (Prather & Sathian, 2002; Robert & Chevrier, 2003; Rösler, Röder, Heil, & Hennighausen, 1993). In same-different judgement tasks, an increase in visual and tactile response times with respect to angular disparity between objects suggests that mental object rotation is similar to real object rotation for both sensory conditions (Dellantonio & Spagnolo, 1990; Marmor & Zaback, 1976; Prather & Sathian, 2002). Other similarities between visual and tactile mental rotation tasks have been highlighted in experiments that reveal that male participants perform better than female participants whether objects are felt or seen (Robert & Chevrier, 2003; Vandenberg & Kuse, 1978). Neurophysiological studies have also revealed similarities between visual and tactile mental rotations. These experiments have identified the parietal cortex as the core region involved in the mental manipulation of an imagined object after either visual or tactile encoding (Cohen et al., 1996; Röder, Rösler, & Hennighausen, 1997; Rösler et al., 1993; Tagaris et al., 1996). The parietal cortex is also considered essential for multisensory representations, being a convergent region for visual and tactile shape processing (Amedi, Malach, Hendler, Peled, & Zohary, 2001).

How can we explain similarities between visual and tactile mental rotations? Some researchers have argued that these similarities imply that mental object manipulation relies on a common process, which could be the generation of a visual representation for both visual and tactile sensory input. Indeed, neuroimaging studies have shown activation in visual-processing regions for both visual (Cohen et al., 1996; Wraga, Shepard, Church, Inati, & Kosslyn, 2005) and tactile mental rotations (Prather, Votaw, & Sathian, 2004; Sathian, 2005). However, some behavioural results have not supported the theoretical position that these spatial imagery abilities depend on visual imagery processes. For example, some experiments have demonstrated that mental spatial abilities are present in both sighted and blind participants (Röder et al., 1997; Rösler et al., 1993). The sighted participants generally outperform blind participants, and those who are

adventitiously blind generally perform better than do those who are congenitally blind. Because subjects who are blind from birth achieve reasonable spatial performances, it is plausible that visual imagery is not absolutely necessary. However, these behavioural data suggest that visual processing is probably advantageous, though not essential, for mental rotation performance.

To date, no study has investigated the link between visual and tactile information processing in relation to spatial imagery abilities using a within-subjects design. One way of determining whether mental rotation abilities are dependent on sensory-specific information processing is to place participants in two successive conditions, with only visual or tactile information, to specifically examine the effects of previous sensory-specific experience on later performance. Because even a single repetition of the visual MRT can lead to improved performance (Casey & Brabeck, 1989; Peters et al., 1995), it was appropriate to use this performance improvement to investigate whether spatial imagery abilities are modality dependent or modality independent. Another important question concerns the possibility that the performance improvement associated with task repetition, thus far reported only for visual mental rotations, may also occur for tactile mental rotations.

In the present experiment, we used a visual computerised version of the MRT and its tactile duplicate made out of wooden cubes. Our use of the MRT implies an interest in general processes, without distinguishing between information pick up and mental rotation processes. Participants performed two test sessions under no-switch (either visual or tactile) or switch conditions (visual-tactile or tactile-visual). In the present experiment, the effect of previous sensory-specific experience on visual and tactile mental rotations would have different theoretical implications. If mental rotation performance improved in the no-switch condition only, it would be reasonable to conclude that solving mental rotation implies modality-dependent processes (i.e., no link between visual and tactile modalities). By contrast, performance improvement under both no-switch and switch conditions for both visual and tactile tasks could suggest some modality-independent processes. Finally, a performance improvement under the switch condition for the tactile task only (i.e., the visual-tactile group) would support an influence of visual experience on mental rotation abilities. Finally,

there is no theoretical reason to expect only visual improvement in the switch condition (i.e., the tactile-visual group).

In mental spatial abilities, two distinct components can be distinguished; one measured by accuracy scores and the other by response time (Egan, 1978). Accuracy scores reflect the combined output of several operations, whereas response time reflects the amount of time required for processing information. In the present study, the effects of previous sensory-specific information were thus analysed separately for accuracy scores and response time. This distinction allows us to investigate whether visual and tactile modalities play the same role or different roles in determining the accuracy of shape representation and the amount of time required to process spatial information.

METHOD

Participants

Ninety-six right-handed university students (48 males; age = 24 ± 4.2 years) volunteered to participate in the experiment. All participants reported normal to normal-corrected vision and no tactile sensation loss. To take part in the study, participants provided their written informed consent.

Tasks and materials

The first 14 items of the MRT (Vandenberg & Kuse, 1978; redrawn version from Peters et al., 1995) were used in the present study. Each item comprised a target and four response choices. The response choices were two rotated reproductions of the target and two distractors (with either mirror presentation or structural differences). Participants were instructed to locate the two rotated reproductions of the target as fast as possible.

In the *visual task* (V), items were presented individually on a *Cintiq185X* interactive pen display, with the computer screen placed approximately 35 cm from the subject. With a digital stylus, participants circled the response options that they believed were correct.

In the *tactile task* (T), wooden items were built to match the 14 visual computer screen items (cube dimensions = 0.9 cm^3). The target and response choices were aligned on a wooden board

and affixed accordingly to nonobtrusive metal stems (high = 6 cm, diameter = 0.3 cm). The response choices were placed behind an occluding screen allowing for tactile exploration. Participants sat down on an adjustable chair facing the apparatus. They touched one figure at a time with their dominant right hand. Participants gave their final two responses by pressing the corresponding light switches near the figure entries.

Procedure

Participants were divided into four groups. They performed the visual and/or tactile task in two consecutive, untimed sessions. In the no-switch condition, participants performed either two consecutive visual tasks (V-V group) or two consecutive tactile tasks (T-T group). In the switch condition, participants performed the visual task and then the tactile task (V-T group) or the tactile task followed by the visual task (T-V group) (see Table 1). The same 14 items and the same order of presentation were used in visual and tactile tasks regardless of the session. Two examples were used to familiarise the participants with the task requirements before each session and with each sensory-specific condition. A 5-minute rest period was allotted between the two consecutive sessions. Participants were never informed of the accuracy of their responses in any of the tasks. During debriefing after the second session, no participants indicated that they were aware of the repeated testing in both the no-switch and switch conditions.

Data analysis

Accuracy scores (i.e., the percentage of correct responses) and response time were calculated. An item was scored as correct when a participant

TABLE 1
Illustration of the experimental design

Groups	Session 1	Session 2	
V-V ($N=24$)	Visual task	Visual task	} No-switch condition
T-T ($N=24$)	Tactile task	Tactile task	
V-T ($N=24$)	Visual task	Tactile task	} Switch condition
T-V ($N=24$)	Tactile task	Visual task	

Each participant performed 2 consecutive sessions in either a no-switch condition (2 visual tasks or 2 tactile tasks: V-V and T-T groups) or a switch condition (1 visual and 1 tactile task: V-T group/1 tactile and 1 visual task: T-V groups).

selected the two rotated reproductions of the target figure. The item was scored as incorrect if zero or only one rotated reproduction was selected (Peters et al., 1995; Vandenberg & Kuse, 1978). The mean response time (the average response time for both the target and response choices) was computed for correct items only (71% of total responses).

For accuracy scores and response times, separate ANOVAs were performed for Session 1 and Session 2.¹ Session 1 analyses (baseline) aimed to examine whether differences appeared between visual and tactile tasks. Session 2 analyses aimed to show the effect of previous sensory experience (i.e., switch condition vs. no-switch condition) on visual and tactile accuracy scores and response times. For each session, both dependent variables were separately submitted to a 2 Tasks (visual vs. tactile) \times 2 Conditions (no-switch vs. switch) ANOVA. The alpha level was set at .05.

To quantify changes from Session 1 to Session 2 (i.e., performance improvement or performance decrement for accuracy scores and response times, respectively), we computed the change rate in Session 2 as a percentage of visual or tactile baselines for each participant. In the no-switch condition, visual baseline and tactile baseline corresponded to the mean accuracy scores and the mean response times from Session 1 (for the V-V and T-T groups). In the switch condition, visual and tactile baseline estimations were computed as follows (detailed for visual baseline estimation): Step 1: average visual data in Session 1 (i.e., average of V-T and V-V groups); Step 2: average visual data was adjusted for individual differences in Session 2 compared with the average performance of their group (T-V group). For example, if a T-V participant required in average 120% of the average response time of his group in Session 2 (i.e., for the visual task), the average visual response time calculated in Step 1 was then multiplied by 1.2. The obtained value

¹Note that in the present experiment, a single ANOVA with task (visual vs. tactile) and session (1 and 2) as within-subjects variables and condition (switch vs. no-switch) as between-subjects variables was not possible. The two tasks were not performed by all participants. Half of them realised the visual task or the tactile task in both sessions, and the other half realised the visual (or tactile) task in Session 1 and the tactile (or visual) task in Session 2. Moreover, an ANOVA with group (V-V, T-T, V-T, T-V) as between-subjects variable and session as within-subjects variable was not appropriate because it confounds the ordering effect with the effect of modality of the task.

corresponded to the visual response time estimation for that T-V participant in Session 1 (i.e., $baseline_{visual}$). A similar procedure was used for tactile baseline estimation. Change rates for the visual task were thus calculated for each participant as follows: $[(baseline_{visual} - session2_{visual}) / baseline_{visual}] \times 100$. A similar procedure was used for the tactile task: $[(baseline_{tactile} - Session2_{tactile}) / baseline_{tactile}] \times 100$. For accuracy scores, a negative change rate indicated that performance improved in Session 2 (i.e., the percentage of correct responses increased), whereas a positive change rate indicated a performance decrement (i.e., accuracy scores decreased). For response times, a negative change rate indicated that response times increased in Session 2, whereas a positive change rate indicated that response times decreased. Change rates for accuracy scores and response times were submitted to a 2 Tasks (visual vs. tactile) \times 2 Conditions (no-switch vs. switch) ANOVA. The alpha level was set at .05. *T*-tests were used to examine whether change rates significantly differed from zero.

RESULTS

In the four groups, no significant Pearson correlations were found between accuracy scores and response times for Sessions 1 and 2 or for their respective change rates, $r_s < .29$, $p_s > .17$, indicating no speed-accuracy tradeoff.

Accuracy scores

For Session 1, there were no significant main effects of task or condition or a significant Task \times Condition interaction ($F_s < 1$). Accuracy scores averaged 66% ($\pm 16\%$) overall, with an average of 64.3% ($\pm 17\%$) for the visual task and 67% ($\pm 15\%$) for the tactile task. These values were used to compute the change rate for visual baseline and tactile baseline, respectively, for participants in the switch condition.

For Session 2, ANOVA yielded no significant main or interaction effects ($F_s < 1$). The average percentage of correct responses was 75% ($\pm 19\%$) without distinction between tasks and conditions.

ANOVA performed on change rates for accuracy revealed no main effect and no interaction ($F_s < 1$). The average change rate was -17.5% for all participants. Significantly different from zero

(*t*-test, $p < .0001$), this negative value indicates that correct responses were more frequent in Session 2 regardless of the task modality or previous experience (no-switch vs. switch condition).

Finally, Pearson correlations between sessions showed that participants with high (or low) accuracy scores in Session 1 had high (or low) accuracy scores in Session 2 for the no-switch condition (V-V and T-T groups) and the switch condition (V-T and T-V groups), $r_s > .54$, $p_s < .002$.

Response times

For Session 1, ANOVA yielded a main effect of task, $F(1, 92) = 129.2$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .58$. As expected, there was not a significant effect of condition or a Task \times Condition interaction ($F_s < 1$). The results revealed that response times were shorter for the visual (24 ± 11 s) than for the tactile task (65 ± 22 s), regardless of the subsequent condition (switch vs. no-switch). These values were used to calculate change rates for visual baseline and tactile baseline, respectively, for participants in the switch condition.

For Session 2, ANOVA yielded significant main effects of task, $F(1, 92) = 103.6$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .53$, and condition, $F(1, 92) = 9.9$, $p = .003$, $\eta_p^2 = .10$. However, the Task \times Condition interaction was nonsignificant ($F < 1$). Consistent with the results for Session 1, response times were shorter for the visual task than the tactile task for both no-switch and switch conditions (Figure 1A). The results also revealed that response times were longer in the switch condition than in the no-switch condition, regardless of the task modality (Figure 1A).

An ANOVA performed on change rates for response time revealed a significant main effect of condition, $F(1, 92) = 9.38$, $p < .005$, $\eta_p^2 = .10$. The main effect of task and the Task \times Condition interaction were nonsignificant ($F_s < 1$). As illustrated on Figure 1B, a positive change rate, significantly different from zero (*t*-test, $p < .001$), appeared for tasks performed in the no-switch condition. However, the negative change rates in the switch condition did not differ from zero. Recall that a positive response time change rate indicates a performance improvement in Session 2 (i.e., a decrease in response time from Session 1 to Session 2).

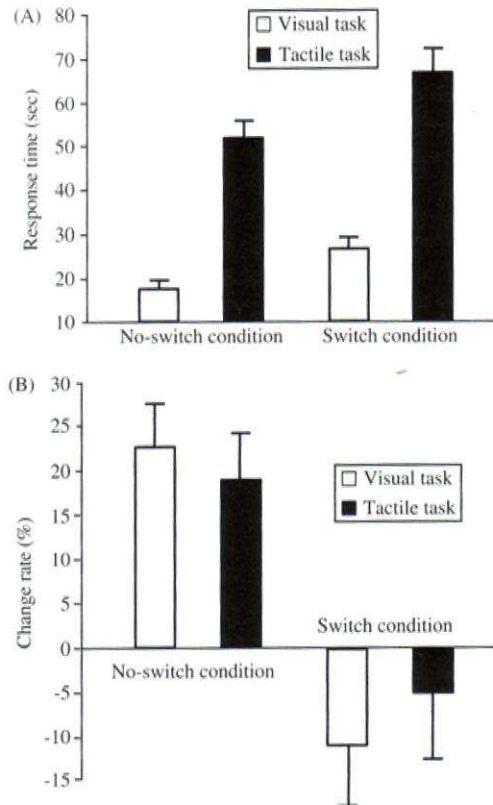


Figure 1. (A) Response time (in seconds) in Session 2 as a function of modality of the task (visual vs. tactile) and condition (no-switch vs. switch). (B) Change rate (in%) from Session 1 to Session 2 for visual and tactile tasks under no-switch and switch conditions. Error bars indicate the standard error of the mean.

Finally, we examined Pearson correlations between Session 1 and 2 for each task and each condition. Significant positive correlations were found for visual, $r = .66$, $p < .001$, and tactile, $r = .57$, $p < .005$, tasks in the no-switch condition. These results indicate that fast (or slow) response times during Session 1 were significantly associated with fast (or slow) response time during Session 2. By contrast, a significant correlation was not found between Session 1 and 2 for the switch condition (for both V-T and T-V groups, $r_s < .34$, $p_s > .11$).

DISCUSSION

In the present study, we compared visual and tactile performances on the Mental Rotations Test (Vandenberg & Kuse, 1978) to evaluate the level of dependence or independence of visual

and tactile information processing in mental rotation abilities. The question addressed was whether sensory-specific (visual or tactile) prior experience with the MRT could influence participants' subsequent performance. In the present experiment, solving two successive mental rotation tasks under no-switch or switch conditions highlighted different patterns of results for accuracy scores and responses times. To clarify this finding, the discussion is separated into sections based on each dependent variable.

Results revealed that accuracy scores were similar for both visual and tactile tasks. Moreover, accuracy scores increased from Session 1 to Session 2 for all groups, regardless of whether previous sensory experience of the task was similar (no-switch condition: V-V and T-T groups) or different (switch condition: V-T and T-V groups). Although practice in Session 1 was limited to a sensory-specific experience (either visual or tactile), a positive transfer appeared on the subsequent repetition of the task even when sensory modalities differed. Tactile accuracy scores increased after an exclusively visual experience and visual accuracy scores increased after an exclusively tactile experience. These results support the view that spatial abilities measured by the MRT are not necessarily tied to a sensory-specific modality. Thus, when performing mental rotations, visual and tactile object recognition may not be dependent on separate sensory representations of shape. This is consistent with recent studies that highlight the existence of a modality-independent representation of geometric shapes (Lacey, Pappas, Kreps, Lee, & Sathian, 2009; Lacey, Tal, Amedi, & Sathian, 2009). Moreover, we observed that the quality of the representation remains constant for both vision and touch, as indicated by strong positive correlations between accuracy scores for Sessions 1 and 2 across all groups. Participants with high (or low) accuracy scores in Session 1 also have the highest (or poorest) performance in Session 2. Thus, the ability to accurately encode and recognise shapes affects accuracy scores in both tactile and mental rotations. This suggests that visual and tactile accuracy scores measured a common process that is the accuracy of the multisensory representation builds up when performing the task.

In mental rotation tasks, response time for correct responses is "an estimate of the sum of the time taken to complete each operation correctly" (Egan, 1978, p. 11). In the present study, results

for response times confirmed that participants were faster in the visual task than the tactile one (Session 1), as previously reported by Robert and Chevrier (2003). More importantly, response times varied as a function of task and condition. For both visual and tactile MRT, participants' response times decreased from Session 1 to Session 2 when both sessions were performed under no-switch conditions (V-V and T-T groups). When the first and second sessions were performed under switch conditions, visual and tactile response time did not significantly improve (V-T and T-V groups). This finding suggests that some characteristics of participants' ability to solve the mental rotation task that developed during the first session did not transfer when the sensory condition changed in the second session, or at least that this transfer was time consuming. This result was reinforced by the correlation analyses for response times, which did not reveal a significant association between visual and tactile MRT. Together, these results could suggest that distinct mental processing of spatial information operates at a lower order for visual and tactile modalities before feeding into a higher order modality-independent representation. The effectiveness of these modality-dependent processes may improve under a no-switch task repetition but may not improve when sensory modalities differ.

Although participants succeeded in solving the tactile MRT as well as the visual MRT, feeling nonvisible three-dimensional objects was probably more time consuming. The longer response time to locate the two rotated reproductions of the target through manual explorations is not new and could be explained by differences in the exploration processes of geometric object properties in visual and tactile modalities. For tactile tasks, the hand follows the contour of a 3-D object until the object is recognised (Lederman & Klatzky, 1997). The gathering of tactile information is thus largely sequential, whereas gathering visual information is more parallel. Moreover, vision and touch exploit different information, and attributes relating to shape are more relevant for vision (Klatzky, Lederman, & Reed, 1987). The encoding of spatial characteristics can nonetheless emerge after tactile exploration, although it takes more time for this to occur after tactile exploration than after visual exploration (Lederman & Klatzky, 1997). As observed in our experiment, these between-modality differences could make the tactile system less effective or

slower than the visual system with respect to spatial abilities. However, we cannot ignore that explanations other than object shape exploration may explain the difference between visual and tactile response times. Studies with a simplified “same–different” paradigm are thus necessary to examine separately the slope and intercept of the function relating performance to angular disparity. This paradigm would allow researchers to determine whether tactile and visual mental rotation similarities or differences are specifically attributable to the encoding, decision-making, and response processes (intercept values) or to mental rotation processes (slope values).

Is prior visual experience important for mental spatial abilities? In the present study, both accuracy scores and response time analyses suggested that this is not the case. The symmetric, cross-modal positive transfer observed for accuracy scores under switch conditions (for V-T and T-V groups) indicates that mental rotation does not depend upon visual experience. Moreover, improvement in accuracy scores and response time after a single repeat of the test was observed under the no-switch condition for both visual and tactile tasks (V-V and T-T groups). According to our change rate analyses, the performance improvement was similar in both tasks. These results suggested that tactile performance in Session 2 is not a consequence of a previous visual experience, at least for unfamiliar or nonsense objects. It may be possible that a different pattern of results would appear for familiar objects due to the visual-tactile shape representations acquired before the experiment through daily simultaneously interactions between vision and touch. Thus, mental spatial abilities do not necessarily depend on visual mediation, as suggested by studies involving congenitally blind people (Carpenter & Eisenberg, 1978; Röder et al., 1997; Rösler et al., 1993).

In our experiment, the use of a within-subjects design has proved informative about the link between visual and tactile information processing for mental spatial abilities measured by the MRT. Our experiment demonstrates that some components of mental rotation abilities are not tied to any specific sensory modality, with both visual and tactile modalities contributing to the elaboration of a higher-order multisensory shape representation. For the elaboration of a modality-independent representation, however, distinct mental processing of spatial information would operate at a lower-order level for visual and

tactile modalities. Further research should identify which of those processes that are involved when solving mental rotations are modality dependent or modality independent. Moreover, because the same stimuli were used in Sessions 1 and 2, we cannot conclude that performance improvement following task repetition was process based (i.e., based on improvement in mental rotation strategies) rather than instance based (i.e., based on memory for specific items). The nature of the spatial task performance improvement has yet to be examined (Wright, Thompson, Ganis, Newcombe, & Kosslyn, 2008). Wright and colleagues (2008) reported that practice effects transfer to novel stimuli as well as to a novel spatial task. However, whether process-based improvement appears when distinct sensory modalities are used remains an open question. Therefore, it is crucial to examine whether practice effects observed when sensory modalities switch from one session to another result from a general skill improvement or were specific to objects memorised in the first session.

Original manuscript received May 2011

Revised manuscript received November 2011

First published online February 2012

REFERENCES

- Amedi, A., Malach, R., Hendler, T., Peled, S., & Zohary, E. (2001). Visuo-haptic object-related activation in the ventral visual pathway. *Nature Neuroscience*, 4, 324–330.
- Carpenter, P. A., & Eisenberg, P. (1978). Mental rotation and the frame of reference in blind and sighted individuals. *Perception and Psychophysics*, 23, 117–124.
- Casey, M. B., & Brabeck, M. M. (1989). Exceptions to the male advantage on a spatial task: Family handedness and college major as factors identifying women who excel. *Neuropsychologia*, 27, 689–696.
- Cohen, M. S., Kosslyn, S. M., Breiter, H. C., DiGirolamo, G. J., Thompson, W. L., Anderson, A. K., et al. (1996). Changes in cortical activity during mental rotation, a mapping study using functional MRI. *Brain*, 110, 89–100.
- Dellantonio, A., & Spagnolo, F. (1990). Mental rotation of tactual stimuli. *Acta Psychologica*, 73, 245–257.
- Egan, D. E. (1978). *Characterizing spatial ability: Different mental processes reflected in accuracy and latency scores* (Research Rep. No. 1250). Pensacola, FL: Naval Aerospace Medical Research Laboratory.
- Klatzky, R., Lederman, S. J., & Reed, C. (1987). There's more to touch than meets the eye: The salience of object attributes for haptics with and without vision. *Journal of Experimental Psychology: General*, 116, 356–369.

- Kosslyn, S. M., DiGirolamo, G. J., Thompson, W. L., & Alpert, N. M. (1998). Mental rotation of objects versus hands: Neural mechanisms revealed by positron emission tomography. *Psychophysiology*, *35*, 151–161.
- Lacey, S., Pappas, M., Kreps, A., Lee, K., & Sathian, K. (2009). Perceptual learning of view-independence in visuo-haptic object representations. *Experimental Brain Research*, *198*, 329–337.
- Lacey, S., Tal, N., Amedi, A., & Sathian, K. (2009). A putative model of multisensory object representation. *Brain Topography*, *12*, 269–274.
- Lederman, S. J., & Klatzky, L. R. (1997). Relative availability of surface and object properties during early haptic processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *23*, 1680–1707.
- Marmor, G. S., & Zaback, L. A. (1976). Mental rotation by the blind: Does mental rotation depend on visual imagery? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *2*, 515–521.
- Parsons, L. M. (1987). Imagine spatial transformation of one's body. *Journal of Experimental Psychology: General*, *116*, 172–191.
- Peters, M., Laeng, B., Latham, K., Jackson, M., Zaiyouna, R., & Richardson, C. (1995). A redrawn Vandenberg & Kuse Mental rotations tests: Different versions and factors that affect performance. *Brain and Cognition*, *28*, 39–58.
- Prather, S. C., & Sathian, K. (2002). Mental rotation of tactile stimuli. *Cognitive Brain Research*, *14*, 91–98.
- Prather, S. C., Votaw, J. R., & Sathian, K. (2004). Task-specific recruitment of dorsal and ventral visual areas during tactile perception. *Neuropsychologia*, *42*, 1079–1087.
- Robert, M., & Chevrier, E. (2003). Does men's advantage in mental rotation persist when real three-dimensional objects are either felt or seen? *Memory and Cognition*, *31*, 1136–1145.
- Röder, B., Rösler, F., & Hennighausen, E. (1997). Different cortical activation patterns in blind and sighted humans during encoding and transformation of haptic images. *Psychophysiology*, *34*, 292–307.
- Rösler, F., Röder, B., Heil, M., & Hennighausen, E. (1993). Topographic differences of slow event-related brain potentials in blind and sighted adult human subjects during haptic mental rotation. *Cognitive Brain Research*, *1*, 145–159.
- Sathian, K. (2005). Visual cortical activity during tactile perception in the sighted and the visually deprived. *Developmental Psychobiology*, *46*, 279–286.
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Sciences*, *171*, 701–703.
- Tagaris, G. A., Kim, S. G., Strupp, J. P., Andersen, P., Ugurbil, K., & Georgopoulos, A. P. (1996). Quantitative relations between parietal activation and performance in mental rotation. *Neuroreport*, *7*, 773–776.
- Vandenberg, S. G., & Kuse, A. R. (1978). Mental rotation, a group test of three-dimensional spatial visualization. *Perceptual and Motor Skills*, *47*, 599–604.
- Wraga, M., Shephard, J. M., Church, J. A., Inati, S., & Kosslyn, S. M. (2005). Imagined rotations of self versus objects: An fMRI study. *Neuropsychologia*, *43*, 1351–1361.
- Wright, R., Thompson, W. L., Ganis, G., Newcombe, N. S., & Kosslyn, S. M. (2008). Training generalized spatial skills. *Psychonomic Bulletin and Review*, *15*, 763–771.

Caissie, A. F., Vigneau, F., & Bors, D. A., (2009). What does the Mental Rotation Test measure? An analysis of item difficulty and item characteristics. *The Open Psychology Journal*, 2, 94-102.

94

The Open Psychology Journal, 2009, 2, 94-102

Open Access

What does the Mental Rotation Test Measure? An Analysis of Item Difficulty and Item Characteristics

André F. Caissie¹, François Vigneau^{2,*} and Douglas A. Bors³

¹Centre de recherche sur la cognition et l'apprentissage, Université de Poitiers, Poitiers, France

²École de psychologie, Université de Moncton, Moncton, Canada

³Department of Psychology, University of Toronto at Scarborough, Scarborough, Canada

Abstract: The present study examined the contributions of various item characteristics to the difficulty of the individual items on the Mental Rotation Test (MRT). Analyses of item difficulties from a large data set of university students were conducted to assess the role of time limitation, distractor type, occlusion, configuration type, and the degree of angular disparity. Results replicated in large part previous findings that indicated that occluded items were significantly more difficult than non-occluded and that mirror items were more difficult than structural items. An item characteristic not previously examined in the literature, configuration type (homogeneous versus heterogeneous), also was found to be associated with item difficulty. Interestingly, no significant association was found between angular disparity and difficulty. Multiple regression analysis revealed that a model consisting of occlusion and configuration type alone was sufficient for explaining 53 percent of the variance in item difficulty. No interaction between these two factors was found. It is suggested, based on overall results, that basic figure perception, identification and comparison, but not necessarily mental rotation, account for much of the variance in item difficulty on the MRT.

Keywords: Mental Rotation Test, spatial ability, mental rotation, item types, item characteristics.

1. INTRODUCTION

Vandenberg and Kuse's [1] Mental Rotation Test (MRT) is one of the most commonly used measures of spatial ability. Performance variability on this test is frequently substantial, even in groups of high-ability subjects such as university students. Yet, the factors responsible for the performance variability on the MRT and for the difficulty of particular items still have not been isolated and understood. It has been suggested in the literature that presence or absence of certain physical characteristics are associated with item difficulty [2].

The MRT is comprised of 24 items in which (two-dimensional) drawings of three-dimensional geometrical figures are to be compared. These figures were adapted by Vandenberg and Kuse [1] from similar figures used by Shepard and Metzler [3] in a series of now classic studies of the concept and definition of mental rotation.

Each MRT item consists of a row of five line drawings, including a geometrical target figure in the left most position followed by four response-choice figures: two rotated reproductions of the target and two distractors (see Fig. 1). The subject's task is to indicate which two of the four response-choice figures are rotated reproductions of the target figure. In the version of the MRT presently examined [4], the 120 figures (targets and response choices) used in the 24 items are based on a total of 10 distinct reference figures (see Fig. 2).

Various factors potentially responsible for item difficulty on the MRT have been suggested. In the present article, these factors (response rate, distractor type, and occlusion) will be examined. Two additional factors previously unaddressed in the literature on the MRT will also be explored: configuration type and angular disparity

Some studies (e.g., [5]) have indicated that item difficulty could be primarily a product of the stringent time limit use in the standard administration of the MRT and other procedural factors such as the scoring scheme associated with the test. The timed condition has also been associated with more response omissions and unanswered test items [6]. Generally speaking, low scoring subjects attempt fewer items. As Goldstein *et al.* [5] hypothesized, it is possible that lower scoring subjects approach the items with more caution and perform at a slower pace than higher scoring subjects. Therefore, items placed nearer to the end of the test are more likely to be left unanswered and thus appear more difficult than they would if they were placed nearer the beginning of the test. Eliminating the effect of procedural artefacts (e.g., time factor) could help clarify the relation between item difficulty and other factors such as spatial abilities [7] and item characteristics [2].

Some approaches to overall performance on the MRT have focused on specific item characteristics. Voyer, Rodgers, and McCormick [6] have suggested an MRT item categorization scheme based on differences in the nature of the item's distractors. According to this scheme, mirror items are contrasted with structural items. Mirror items are items whose distractors have the same relations between their configuration's segments as the target figure, but are mirror im-

*Address correspondence to this author at the École de psychologie, Université de Moncton, Moncton NB E1A 3E9, Canada; Tel: 506 858-4836; Fax: 506 858-4768; E-mail: f.vigneau@umoncton.ca

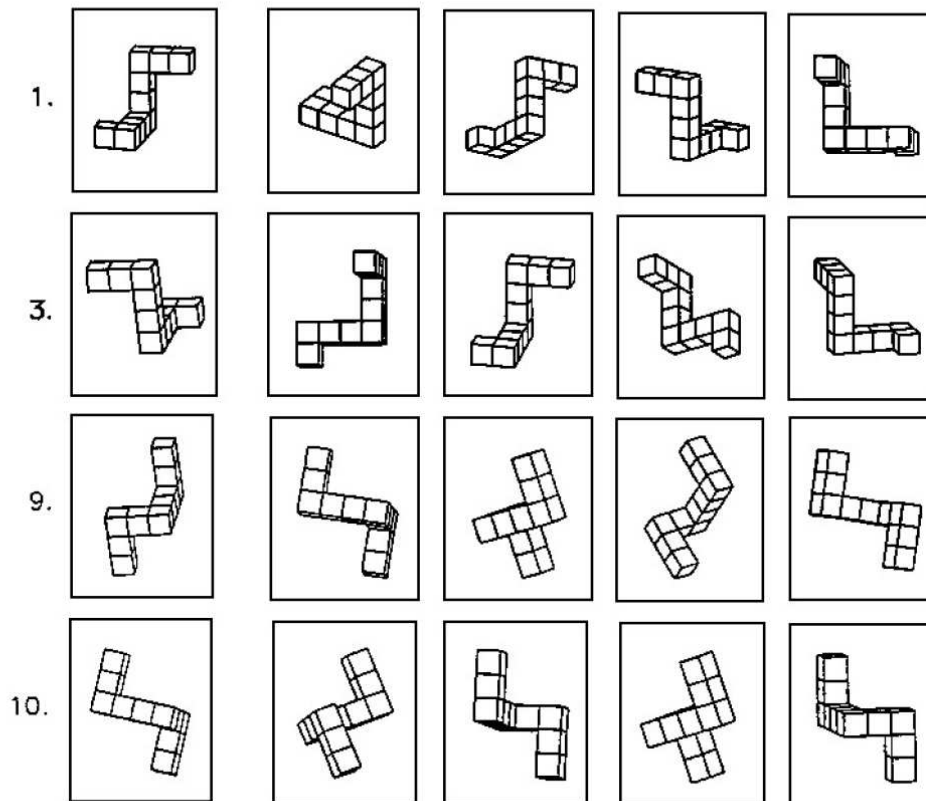


Fig. (1). Item types. Mirror items (item 1, item 9, item 10), structural item (item 3), non-occluded items (item 1, item 3), occluded items (item 9, item 10), heterogeneous items (item 1, item 3), and homogeneous items (item 9, item 10).

ages of the target figure. By contrast, in structural items, the distractors and the target figures differ in their segment relations [2]. MRT items 1, 2, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 19, 20 were classified by Voyer and Hou [2] as mirror items, whereas items 3, 4, 7, 8, 13, 14, 17, 21, 22, and 24 were classified as structural. Two items, called mixed items (18 and 23), could not be classified according to this dichotomy because they each include one structural and one mirror distractor. Examples of structural and mirror items can be found in Fig. (1). Worth noting is the fact that item categories are not equally distributed across the test. For instance, there are more mirror items than there are structural items, and there are few mixed items.

Voyer and Hou [2] also offered an item categorization based on the presence or absence of physical occlusion in response choices. Occlusion means that significant parts of the three-dimensional figure are covered by other parts and are thus not directly visible to the observer. It is important to note that occlusion is defined in this context only with respect to correct choices, not distractor or target figures. With

occlusion so defined, Voyer and Hou [2] identified items 9, 10, 11, 14, 15, 17, 18 as occluded items, and items 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 13, 16, 19, 20, 21, 22, 23 and 24 as non-occluded items. Examples of occluded and non-occluded items can be found in Fig. (1). As was the case with distractor types, occlusion item categories are somewhat clustered with respect to item position in the test. For example, no occluded items appear amongst the first eight items.

Voyer *et al.* [6] hypothesized that structural items would be easier to solve than mirror items because their distractors allow subjects to rely on simple basic object recognition processes, whereas mirror items possibly require the creation of a more integrated mental schema of the response choice figures to correctly mentally rotate and compare the distractors to the target figure. Correct performance on mirror items would imply that subjects mentally represent one of the geometrical figures in the orientation of another. This would be consistent with cognitive studies of the processes involved in judging whether figures of differing angular orientation are the same or different [3, 8]. This need to make a

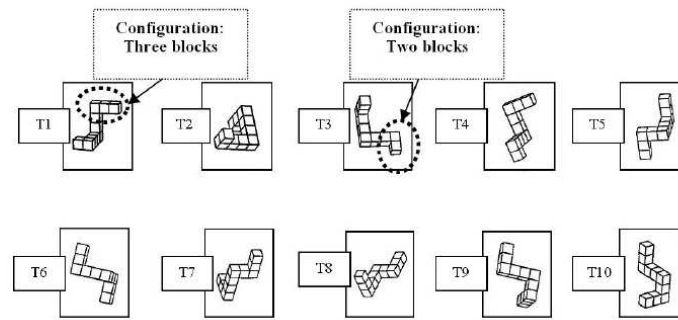


Fig. (2). Ten reference figures used to construct the MRT items. Pairs T1-T2, T3-T4, T5-T6, T7-T8, T9-T10 are mirror images. T1-T8 is a pair of structurally different figures. Figures T1, T2, T3, and T4 have peripheral segments constructed of 2 and 3 blocks (heterogeneous). Figures T5, T6, T7, T8, T9 and T10 have both peripheral segments constructed of three blocks (homogeneous).

mental representation would also relate to the idea that a mental analogue of a three-dimensional object rotation takes place during the resolution of MRT items.

Voyer and Hou [2] argued that the occlusion of substantial visual information makes the comparison of the correct response choices with the target figure more difficult because it could cause misperceptions of the correct response figures, leading subjects to misidentify them as distractors. It could also be the case that subjects are required to do more comparative work to rule out some other alternatives in the occluded items. Thus, non-occluded correct response figures should be easier to identify than occluded ones.

Configuration type, an item characteristic not previously addressed in the MRT literature, was also examined in the present study. Each figure of the MRT has three structural angles of 90 degrees, or three vertices relating four segments. This common structure resulted in the 10 reference figures which, along with various rotations of these reference figures, constitute the entire set of target figures and response choices in the MRT (see Fig. 2). These 10 reference figures can be reduced to two broad categories according to the number of blocks included in the peripheral segments of the figure. The figures used in items 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, and 23 are based on figure types T1, T2, T3, or T4 (see Fig. 2). In all of these figures the two peripheral segments are constructed of two and three blocks. Because of the differing number of blocks on the peripheral segments, these figures can be called heterogeneous configurations. The figures in items 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, and 24 are based on figure types T5, T6, T7, T8, T9, and T10, all of which have both peripheral segments constructed of three blocks (homogeneous configurations). As can be observed from the order of the items in the MRT, configuration type is associated with item position. All figures used in the first eight items have heterogeneous configuration, whereas figures with both peripheral segments constructed of three blocks start on item 9. Despite this confound, it could be reasonably hypothesized that configuration type so defined could contribute to item difficulty. Heterogeneous configura-

tions are more likely to help figure identification and mental rotation by offering additional discriminative elements than are homogeneous configurations. That is, the number of blocks on a segment can simply be counted and the response choice figure retained or excluded as a possible correct match without the need of any mental rotation. Consequently, it is predicted that homogeneous configuration items will be more difficult than heterogeneous configuration items.

Finally, angular disparity was examined. Angular disparity between the target figure and the response choices figures has been considered an important feature of the MRT. Variability in angular disparity was central to Shepard and Metzler's [3] chronometric studies that evaluated subjects' reaction times in the comparison of two complex figures placed in different orientations. Results consistently showed that reaction times were directly proportional to the total degrees of angular disparity between the two figures [3, 9]. A linear relationship between angular disparity and response time was clearly demonstrated. Response latency increased monotonically from 1 degree to 180 degrees of angular disparity, and was reversed as the angular disparity became greater than 180 degrees. In the case of the MRT, these findings lead to the hypothesis that, as the degrees of angular disparity are increased, item difficulty will increase. This increase in item difficulty would then be viewed as a consequence of increased solution time.

Given the central role played by angular disparity in the experimental research on spatial cognition, it is surprising to note the lack of studies addressing the role played by this factor in item difficulty on the MRT. Although there is a lack of information as to what effect angular disparities have on subjects' performance scores, it has been commonly assumed that the MRT was based on the idea that subjects are required to mentally rotate a mental image of complex figures and then compare response choices to the model figure. For the present study, angular disparity characteristics were determined for each MRT item. They are presented in the Appendix.

Previous studies of MRT performance and item difficulty have examined factors in isolation and independently from one another. The present study does attempt to replicate those studies. Through the use of multiple regression, however, the present study goes on to test the relative importance of these factors and their possible interactions.

2. METHOD

2.1. Subjects

The data were collected through administration of the MRT to 624 undergraduate students (407 women, 217 men) from the Université de Moncton and the University of Toronto. Mean age for the group was 21 years ($SD = 4.3$). Subjects ranged in age from 17 to 58 years (5.4% of the subjects were older than 25 years).

2.2. Measure

The Mental Rotation Test (MRT; [1]) is comprised of 24 items, six items on four separate pages in the test booklet [4]. Each item is comprised of a row of five line drawings including a geometrical target figure in the left-most position followed by four response-choice figures: two rotated reproductions of the target and two distractors (see Fig. 1). The subject's task is to indicate which two of the four response-choice figures are rotated reproductions of the target figure, allowing free rotation in three-dimensional space. In each item there are always two and only two correct figures and two incorrect distractor figures.

2.3. Procedure

Standard administration instructions of the MRT were used. Accordingly, subjects were instructed to find, for each item, two response choices with figures identical to the target figure. Subjects were allotted a ten minute time limit to complete the task, and were informed when there were 5 minutes remaining and again when there were 2 minutes remaining. Instructions emphasized that subjects should refrain from guessing. Instructional items were administered followed by the 24-item MRT.

Administration sessions were carried out in groups ranging from 30 to 70 subjects. In one of the two universities, subjects were given course credits for their participation. The scoring of individual performances was according to Vandenberg and Kuse [1]: Subjects were given one point for each item on which they successfully identified both correct response (24 thus represents a perfect total score).

3. RESULTS

For the sample of 624 subjects (Sample 1), the mean total MRT score was 11.46 ($SD = 6.12$). The test as a whole was found to be internally consistent, Cronbach's $\alpha = 0.91$. Percent correct and response rates for each MRT item are presented in Table 1 for Sample 1. Item difficulty (or p , percent correct) was associated with the items' positions in the test, the items at the beginning of the test having higher percents correct than those at the end of the test. Also as expected, response rate was associated with item position:

items at the end of the test were left unanswered more often than those at the beginning of the test. In all likelihood, this decreased response rate with increasing item number was, at least in part, a consequence of many subjects being unable to respond to all items within the time allotted to complete the test. This variability in item response rate also means that item difficulty statistics may be difficult to interpret. Specifically, the extent to which the variation in percent correct was a consequence of some item characteristics and the extent to which it was a consequence of the time limit are impossible to disentangle. To avoid such interpretational difficulties, unless indicated otherwise the subsequent analyses were conducted on a sub-sample (Subsample 1b) of 218 subjects (115 women and 103 men) comprised only of those individuals who responded to most (23 or 24) items, thus providing a form of control of the effects of time limit on response rate. Mean total MRT score for Subsample 1b was 15.00 ($SD = 6.69$). The internal reliability of the test for this sample was satisfactory (Cronbach's $\alpha = 0.92$). As shown in Table 1, item difficulties for these 218 subjects ranged from 31% (item 17) to 87% (item 3), and response rates ranged from 81 % (item 24) to 98 % (item 2).

Also reported in Table 1 are the corrected item-total correlations for each MRT item (Sample 1). These correlations ranged between 0.28 and 0.66 ($M = 0.51$, $SD = 0.08$), which is consistent with previous reports. In the response-rate controlled Subsample 1b, item discriminations ranged between 0.29 and 0.71 ($M = 0.55$, $SD = 0.11$). In this case of Subsample 1b, there was no significant linear relation between item discrimination and item difficulty, Sample 1: $r = -0.33$, $p = 0.11$, Subsample 1b: $r = 0.12$, $p = 0.57$.

3.1. Composite Scores Analyses

Difficulty analysis was conducted for the various categories of item characteristics. Mean scores for mirror, structural, occluded, non-occluded, homogeneous, and heterogeneous items were calculated by summing the correctly scored items in each of these six categories and dividing by the number of items in the categories, thus producing scores expressed as proportions correct. Proportion correct statistics for the various item categories are reported in Table 2 separately for Sample 1 and for Subsample 1b, along with reliability data for those composite scores. As might be expected, the mean scores for all six categories were higher in Subsample 1b than they were in Sample 1. Furthermore, and more interestingly, the pattern of differences between the two samples was stable over item characteristics.

Paired-comparison t-test conducted on Subsample 1b showed a significant difference between accuracy on mirror items and accuracy on structural items ($t = 5.33$; $df = 217$, $p < 0.01$). Mirror items were significantly more difficult than structural items. A paired-comparison t-test also showed a significant accuracy difference between non-occluded items and occluded items ($t = 15.25$; $df = 217$, $p < 0.01$), indicating that occluded items were significantly more difficult than non-occluded items. This second test represents a replication of Voyer and Hou [2]. In terms of configuration type, homogeneous configuration items were more difficult

Table 1. Item Difficulty, Accuracy for Correct Response Figures. 1 and 2, Response Rate, and Item-Total Correlations in Sample 1 ($n = 624$) and Subsample 1b ($n = 218$)

Sample 1						Subsample 1b					
Item	p	$pCR1$	$pCR2$	RR	r_{it}	Item	p	$pCR1$	$pCR2$	RR	r_{it}
1	0.67	0.74	0.90	0.97	0.50	1	0.67	0.71	0.94	0.98	0.63
2	0.67	0.78	0.77	0.93	0.45	2	0.70	0.81	0.78	0.94	0.60
3	0.87	0.92	0.94	0.98	0.28	3	0.87	0.92	0.92	0.98	0.36
4	0.76	0.91	0.79	0.94	0.44	4	0.76	0.91	0.79	0.95	0.57
5	0.64	0.85	0.72	0.93	0.50	5	0.71	0.87	0.78	0.97	0.64
6	0.72	0.87	0.81	0.95	0.46	6	0.71	0.86	0.81	0.96	0.66
7	0.74	0.85	0.81	0.92	0.46	7	0.75	0.86	0.82	0.94	0.60
8	0.76	0.85	0.82	0.91	0.53	8	0.80	0.89	0.86	0.96	0.64
9	0.32	0.39	0.65	0.82	0.47	9	0.38	0.43	0.73	0.91	0.52
10	0.50	0.70	0.66	0.81	0.45	10	0.57	0.72	0.78	0.89	0.56
11	0.35	0.66	0.40	0.73	0.55	11	0.42	0.74	0.49	0.84	0.66
12	0.63	0.72	0.74	0.84	0.59	12	0.72	0.82	0.84	0.96	0.62
13	0.62	0.70	0.71	0.76	0.54	13	0.78	0.86	0.88	0.93	0.42
14	0.49	0.62	0.54	0.65	0.59	14	0.66	0.80	0.72	0.86	0.59
15	0.33	0.36	0.52	0.62	0.62	15	0.49	0.52	0.73	0.89	0.63
16	0.37	0.56	0.43	0.62	0.66	16	0.57	0.84	0.63	0.93	0.71
17	0.16	0.25	0.43	0.54	0.42	17	0.31	0.43	0.73	0.89	0.39
18	0.39	0.51	0.46	0.57	0.58	18	0.60	0.81	0.73	0.93	0.60
19	0.32	0.47	0.36	0.49	0.55	19	0.59	0.87	0.63	0.92	0.51
20	0.28	0.37	0.34	0.43	0.61	20	0.61	0.76	0.75	0.92	0.61
21	0.23	0.32	0.31	0.39	0.48	21	0.52	0.73	0.70	0.90	0.38
22	0.24	0.31	0.28	0.34	0.54	22	0.62	0.78	0.74	0.88	0.53
23	0.21	0.27	0.26	0.32	0.52	23	0.61	0.78	0.75	0.91	0.54
24	0.21	0.25	0.24	0.28	0.41	24	0.60	0.71	0.69	0.81	0.29

Note. p = item difficulty (percent correct); $pCR1$ = accuracy on correct response Fig. (1); $pCR2$ = accuracy on correct response Fig. (2); RR = response rate; r_{it} = (corrected) item-total correlation.

than heterogeneous configuration items ($t = 12.89$; $df = 217$, $p < 0.01$).

3.2. Item Analyses

Position in the test was explored as a potential source of item difficulty. In Sample 1, item position, indexed by item number (1 through 24), was strongly associated with item difficulty ($r = -0.86$, see Table 3). In Subsample 1b, where response rate variations across items was controlled through subject selection, the correlation between item position and item difficulty was substantially reduced; it remained, however, significant ($r = -0.45$, $p = 0.03$).

In Subsample 1b, item difficulty was also found to be significantly associated with the presence of an occlusion ($r = -0.67$) and with configuration type ($r = -0.66$; see Table 3). Distractor type (mirror vs. structural), surprisingly, showed no significant association with difficulty ($r = -0.26$, $df = 20$, $p = 0.28$). Thus, when the average performance on an item is used for the analysis rather than individual scores, difficulty is found to be only weakly and not significantly related to distractor type. Furthermore, controlling for configuration type attenuated the correlation between item position and item difficulty to the point of removing practically all association (partial $r = 0.01$, $p = 0.95$). This result, com-

Table 2. Percent Correct, Skewness of Percent Correct, Response Rate, Skewness of Response Rate, and Alpha Reliability for Each Item Type Category in Sample 1 ($n = 624$) and Subsample 1b ($n = 218$)

Sample 1							
	Difficulty			Response Rate			
Item type category	<i>M</i>	<i>SD</i>	Skew	<i>M</i>	<i>SD</i>	Skew	Cronbach's alpha
Mirror	0.48	0.29	0.14	0.76	0.32	-0.68	0.85
Structural	0.54	0.25	-0.10	0.67	0.21	-0.04	0.77
Occluded	0.36	0.30	-0.52	0.68	0.22	-0.60	0.77
Non-occluded	0.54	0.26	0.01	0.70	0.24	0.00	0.87
Heterogeneous	0.67	0.27	-0.74	0.87	0.13	-1.71	0.82
Homogeneous	0.34	0.29	0.66	0.57	0.33	-0.16	0.88
Subsample 1b							
	Difficulty			Response Rate			
Item type category	<i>M</i>	<i>SD</i>	Skew	<i>M</i>	<i>SD</i>	Skew	Cronbach's alpha
Mirror	0.59	0.32	-0.36	0.93	0.13	-2.21	0.89
Structural	0.67	0.25	-0.62	0.91	0.16	-2.17	0.77
Occluded	0.49	0.33	-0.02	0.89	0.19	-1.80	0.81
Non-occluded	0.68	0.28	-0.59	0.93	0.12	-2.53	0.89
Heterogeneous	0.73	0.30	-0.96	0.96	0.10	-3.18	0.87
Homogeneous	0.55	0.29	-0.11	0.89	0.17	-1.93	0.87

Table 3. Correlations between Item Difficulty (p), Item Position, Item Response Rate, Distractor Type, Occlusion, and Configuration Type Computed on 24 MRT Items in Sample 1 and Subsample 1b

	1	2	3	4	5	6
1. Item difficulty	1	-0.45*	0.61**	-0.26	-0.67**	-0.66**
2. Item position	-0.86**	1	-0.64**	-0.29	0.09	0.66**
3. Item response rate	0.90**	-0.97**	1	0.18	-0.48*	-0.71**
4. Distractor type	-0.06	-0.29	0.28	1	0.09	0.00
5. Occlusion	-0.35	0.09	-0.06	0.09	1	0.54**
6. Configuration type	-0.75**	0.66**	-0.64**	0.00	0.54**	1

Note. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$. Sample 1 ($n = 624$; 407 women and 217 men) below the main diagonal, Sample 1b ($n = 218$; 115 women and 103 men) above the main diagonal.

bined with the fact that controlling for item position attenuated only slightly the correlation between item difficulty and configuration type (partial $r = 0.55$), indicates that despite the substantial association between item position and configuration type ($r = 0.66$), configuration type, not item position, may be the main determinant of item difficulty in a response rate controlled sample.

3.3. Angular Disparity

Degrees of angular disparity relative to the target figure for each of the two correct response figures are presented in the Appendix for each item. Accuracy rates for each of the 48 correct response figures are presented in Table 1. Degrees of angular disparity were obtained by measuring angular rotations of three-dimensional analogue figures placed to

conform to the various items of the MRT. They are expressed in terms of orthogonal axes (x, y, z) in the three-dimensional space. With respect to the present angular disparity characterization, MRT items were found to vary mainly in terms of rotation about the y axis (see Appendix).

Analyses failed to show any association between angular disparities on the y axis and accuracy for correct response figures ($r = 0.01, p = 0.97$). Analyses also failed to show any significant association between accuracy for correct response figures and angular disparities on the x ($r = -0.13, p = 0.39$) and the z axis ($r = -0.07, p = 0.65$). Thus, there is little evidence to suggest that degree of angular disparity per se between response figures and the target figure is a determining factor of item difficulty.

3.4. Models of Item Difficulty

Based on the 24 Vandenberg and Kuse [1] scored items, several models of item difficulty were examined. To begin with, distractor type, occlusion, and configuration type were used to predict item difficulty. In the response-rate controlled Subsample 1b, two significant predictors with independent contribution emerged: occlusion and configuration type, multiple $R = 0.76$ ($R^2 = 0.57$, adjusted $R^2 = 0.53$, see Table 4). The model that included distractor type only increased the adjusted R^2 to 0.55. Further regression analyses revealed that there was no three-way interaction nor were there any two-way interactions.

Multiple regression models using the 48 correct response figure accuracies were analysed to include an assessment of angular disparity along with the other predictors used in previous regression. The significant predictors were again found to be occlusion and configuration type in Subsample 1b (see Table 5). Again, further regressions revealed no significant interactions. Surprisingly, angular disparities accounted for little of the variance in difficulty in both these analyses. Angular disparity may be related to response latency, but it does not appear to be related to item difficulty.

4. DISCUSSION

The present study aimed at extending our understanding of the sources of item difficulty on the MRT. In this undertaking we have replicated the importance of some previous factors, failed to replicate another, and uncovered a new factor. The findings revealed a substantial simple association between MRT item difficulty and three item characteristics: distractor type, occlusion, and configuration type. Specifically, mirror items, occluded items, and homogeneous configuration items were found to be significantly more difficult than their structural, non-occluded, and heterogeneous counterparts. This was found to be the case for both the overall sample and the subsample for which response rate was controlled.

With respect to distractor type and occlusion, the results replicated and generalized the earlier findings of Voyer and Hou [2], who used an untimed administration of the MRT. The analyses of the items' configuration types were original to the present study and demonstrate a substantial effect of this additional item characteristic on item difficulty. Specifically, homogeneous figure items—items with peripheral segments of the same length—were shown to be significantly more difficult than heterogeneous items. Again, this was the case in both the overall and the response-rate controlled samples. The fact that heterogeneous items were easier to solve than were the homogeneous items may be due to the ease with which the segments can be discriminated. In this respect, heterogeneous items, with their peripheral segments of differing lengths, likely offer more salient cues as to figure orientation, thus making them easier to compare with rotated versions. This is a factor worthy of further investigation.

Somewhat surprisingly, for both samples, the degree of angular disparity between correct response figures and target figure was not found to be significantly related to response accuracy. Based on these results, it thus appears

Table 4. Regression Model of MRT Difficulty (24 Items; Subsample 1b ($n=218$))

Final model ($R^2=0.57$; adjusted $R^2=0.53$)	Correlation Coefficients						
	Beta	<i>t</i>	Sig.	Zero-order	Partial	Semi-partial	Tolerance
Occlusion	-0.43	-2.55	0.02	-0.67	-0.49	-0.36	0.71
Configuration type	-0.43	-2.53	0.02	-0.66	-0.48	-0.36	0.71

Table 5. Regression Model of MRT Difficulty (48 Correct Responses Figures; Subsample 1b ($n=218$))

Final model ($R^2=0.36$; adjusted $R^2=0.33$)	Correlation Coefficients						
	Beta	<i>t</i>	Sig.	Zero-order	Partial	Semi-partial	Tolerance
Occlusion	-0.34	-2.4	0.02	-0.53	-0.34	-0.29	0.71
Configuration type	-0.35	-2.4	0.02	-0.53	-0.34	-0.29	0.71

that although angular disparity may slow a subject's response rate, it is not a characteristic that, in itself, significantly affects an item's difficulty. Such a result was clearly unexpected and is inconsistent with a view of the MRT as a test of mental rotation. Potential reasons for this discrepancy may be found in the fact that most of the research reporting a relation among item difficulty, response time and mental rotation use simple two-dimensional stimuli rather than two-dimensional representation of tri-dimensional objects (see the seminal work of Cooper & Shepard [10]), or use highly practiced subjects (e.g., Shepard & Metzler [3], or Albers & Höft [11] for a recent example). In any case, it is suggested, based on overall results, that basic figure perception, identification and comparison, but not necessarily mental rotation, account for much variance in item difficulty on the MRT.

Our conclusion is supported by the multiple regression analyses. It was found that occlusion and configuration type together accounted for over 50 percent of the variance in item difficulty. The addition of the other variables (distractor type and angular disparity) that would upon inspection appear to be more related to the process of mental rotation failed to significantly increase the amount of explained variance. It should be noted that we do recognize that these findings and the relative importance of the explanatory variables may be a reflection of the university population from which we sampled. Perhaps a sample from a more general population would increase the importance of distractor type and angular disparity. The effect of practice on the relative contribution of the various difficulty factors should also be investigated in future research.

APPENDIX

Voyer and Hou's³ MRT distractor type and occlusion classifications, configuration type, and correct response Figs. (1 and 2) angular disparities on the y, x, and z axes.

Item	DT	Occl.	CT	CR1Y	CR1X	CR1Z	CR2Y	CR2X	CR2Z
1	M	NO	Hetero	110	17	10	170	0	10
2	M	NO	Hetero	145	20	10	80	15	10
3	S	NO	Hetero	170	0	10	60	3	0
4	S	NO	Hetero	160	15	10	85	10	10
5	M	NO	Hetero	95	8	0	165	8	0
6	M	NO	Hetero	145	1	0	80	0	0
7	S	NO	Hetero	175	0	0	68	8	0
8	S	NO	Hetero	180	0	0	90	2	0
9	M	O	Homo	120	10	0	130	15	10
10	M	O	Homo	160	15	10	70	15	10
11	M	O	Homo	130	40	0	95	2	0
12	M	NO	Hetero	90	5	10	50	7	0
13	S	NO	Homo	165	25	10	65	2	0
14	S	O	Homo	180	5	10	85	5	10
15	M	O	Homo	120	10	0	100	3	0
16	M	NO	Homo	160	55	20	160	58	80
17	S	O	Homo	180	0	0	75	2	0
18	Mixed	O	Homo	170	7	0	95	12	0
19	M	NO	Homo	110	7	0	150	20	0
20	M	NO	Homo	120	1	0	60	18	0
21	S	NO	Homo	165	14	0	45	12	0
22	S	NO	Homo	170	27	0	120	1	0
23	Mixed	NO	Hetero	155	0	0	175	0	0
24	S	NO	Homo	70	15	10	125	25	0

Note. DT = distractor type, occl. = occlusion, CT = configuration type, CR1Y: Correct response Fig. (1) angular disparity on the y axis; CR1X: Correct response Fig. (1) angular disparity on the x axis; CR1Z: Correct response Fig. (1) angular disparity on the z axis; CR2Y: Correct response Fig. (2) angular disparity on the y axis; CR2X: Correct response Fig. (2) angular disparity on the x axis; CR2Z: Correct response Fig. (2) angular disparity on the z axis. M = Mirror, S = Structural, O = Occluded, NO = Nonoccluded, Hetero = Heterogeneous, Homo = Homogeneous.
³[2].

REFERENCES

- [1] Vandenberg SG, Kuse AR. Mental rotation, a group test of three-dimensional spatial visualization. *Percept Mot Skills* 1978; 47: 599-604.
- [2] Voyer D, Hou J. Type of items and the magnitude of gender differences on the Mental Rotations Test. *Can J Exp Psychol* 2006; 60: 91-100.
- [3] Shepard RN, Metzler J. Mental rotation of three dimensional objects. *Science* 1971; 171: 701-3.
- [4] Peters M, Laeng B, Latham K, Jackson M, Zaiyouna R, Richardson C. A redrawn Vandenberg and Kuse mental rotations test: different versions and factors that affect performance. *Brain Cogn* 1995; 28: 39-58.
- [5] Goldstein D, Haldane D, Mitchell C. Sex differences in visual-spatial ability: the role of performance factors. *Mem Cogn* 1990; 18: 546-50.
- [6] Voyer D, Rodgers MA, McCormick PA. Timing conditions and magnitude of gender differences on the Mental Rotations Test. *Mem Cogn* 2004; 32: 72-82.
- [7] Lohman DF. The effect of speed-accuracy tradeoff on sex differences in mental rotation. *Percept Psychophys* 1986; 39: 427-36.
- [8] Jolicoeur P. Mental rotation and the identification of disoriented objects. *Can J Psychol* 1988; 42: 461-78.
- [9] Tapley SM, Bryden, MP. An investigation of sex differences in spatial ability: mental rotation of three dimensional objects. *Can J Psychol* 1977; 31: 122-30.
- [10] Cooper LA, Shepard RN. Chronometric studies of the rotation of mental images. In: Chase WG, Ed. *Visual information processing*. New York: Academic Press 1973; pp. 76-176.
- [11] Albers F, Höft S. "Do it again and again. And again?" Übungseffekte bei einem computergestützten Test zum räumlichen Vorstellungsvermögen. *Diagnostica* 2009; 55: 71-83.

Received: November 21, 2008

Revised: February 12, 2009

Accepted: September 21, 2009

© Caissie et al.; Licensee Bentham Open.

This is an open access article licensed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted, non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the work is properly cited.

Vigneau, F., Caissie, A. F., & Bors, D. A. (2006). Eye-movement analysis demonstrates strategic influences on intelligence. *Intelligence*, 34, 261-272.



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

Intelligence 34 (2006) 261–272



Eye-movement analysis demonstrates strategic influences on intelligence

François Vigneau^{a,*}, André F. Caissie^a, Douglas A. Bors^b

^a *Ecole de psychologie, Université de Moncton, Moncton, New Brunswick, Canada E1A 3E9*

^b *Department of Life Sciences, University of Toronto at Scarborough, Scarborough, Ontario, Canada M1C 1A4*

Received 11 July 2005; received in revised form 11 November 2005; accepted 22 November 2005

Available online 9 February 2006

Abstract

Taking into account various models and findings pertaining to the nature of analogical reasoning, this study explored quantitative and qualitative individual differences in intelligence using latency and eye-movement data. Fifty-five university students were administered 14 selected items of the Raven's Advanced Progressive Matrices test. Results showed that individuals differed in terms of speed, but also in terms of differences in strategies. More specifically, higher and lower ability subjects differed in terms of their patterns of item and matrix inspections, and several strategic indices (proportional time on matrix, number of alternations between matrix and response choice, latency to first alternation, matrix time distribution) emerged in regression analyses as significant predictors of Raven performance. Given the high reliabilities associated with these strategic indices, it is argued that these results provide evidence against a strong basic-information-processing view and supports a multifaceted view of individual differences in intelligence that includes differences in strategies.

© 2005 Elsevier Inc. All rights reserved.

1. Introduction

The nature of intelligence has now been the object of scientific debates in psychology for several decades. Even when limited to the notion of psychometric intelligence, and even when limited to explaining performance on a single intelligence test, psychological research still often results in several incompatible models. Raven's Progressive Matrices is one such test for which several explanatory models have been proposed. Given that this test has repeatedly been shown to correlate well with several other intelligence tests, it is often considered a good measure of *g*, or general intelligence. In fact, one would expect that uncovering the determinants of Raven performance

would contribute significantly to our understanding of intelligence.

A first category of models of Raven performance is based on the consistent finding of a correlation with various elementary cognitive tasks, such as reaction-time (RT) and inspection-time (IT) tasks (see Jensen, 1987; Neubauer, 1995; Vernon, 1987). Models in this category often refer to mental speed as a fundamental determinant of performance. In this basic-information-processing view, it is assumed that the speed of information processing (RT) or the speed of information intake (IT) is a central limiting factor of information processing. However, the interpretation of the correlations between elementary tasks and higher order intelligence in terms of causality has also frequently been questioned (Bors, MacLeod, & Forrin, 1993; Detterman, 1987; Longstreth, 1984), leaving the debate for the most part inconclusive.

* Corresponding author.

E-mail address: vigneaf@umoncton.ca (F. Vigneau).

Bearing similarities with, but more specific than, general mental speed hypotheses is Verguts, De Boek, and Maris' (2000) response fluency, or generation speed hypothesis. This model assumes that a certain number of solution rules have to be generated by the subject to correctly answer reasoning ability problems. In the analogy they use, solution rules are compared to balls in an urn, with subjects sampling rules as they would sample balls from that urn. Some of the rules sampled may be appropriate to solve the problems, others may not. One of the subjects' tasks is then to retain, from those possibilities, the correct rules. In this context, individual differences can be thought of as sampling balls at different rates, the faster individuals sampling more balls, in a given period of time, than the others, thus increasing their probability of finding the correct rule. Verguts et al.'s (2000) hypothesis received empirical support. However, as the authors point out themselves, generation speed is probably not the only individual differences factor in the Raven.

The most widely-known comprehensive model of intelligent performance as measured by the Raven is probably Carpenter, Just, and Shell's (1990). Based on their analysis of verbal protocols, eye-movement patterns and errors, they concluded that subjects varied mainly in terms of their capacity to induce abstract relations and in terms of working memory capacity ("the differential ability to manage the hierarchy of goals and subgoals", p. 429). Since then, this account of Raven performance has been reported in virtually all the studies published on the Raven. In Carpenter et al. (1990), item difficulty is viewed as a consequence of the number of rules and rule "tokens" (instances) needed to solve the items. Five rules were identified: constant in a row, quantitative pairwise progression, figure addition or subtraction, distribution of three values, and distribution of two values. Fundamental to Carpenter et al.'s model is the idea that the more rules (and the more rule instances) are required to solve the item, the more taxing is the item for working memory. This idea is supported by a correlation, obtained in a sample of 12 university students, of $r=0.75$ between mean item error rate and the total number of rules in items (correlation based on 32 classified items, out of the 48 items included in APM sets I and II). However, the association between memory load and item difficulty, although it is supported, may reflect a general factor more than an individual differences factor. That is, whereas difficulty may be, at least in part, associated with the number of rules needed to solve the items, the range of variations might not be large enough to trigger the expression of individual

differences in working memory. The number of rule instances associated with any given item by Carpenter et al. (1990) varies between 1 and 4 (5, if one includes the last and most difficult item no. 36).

In fact, specific tests of Carpenter et al. (1990) working memory hypothesis do not support their explanation of individual differences. A recent study by Unsworth and Engle (2005) showed that the relation between working memory capacity and the Raven seems to be rather constant across levels of difficulty and memory load. This result is incompatible with the view that the number of rules and rule instances required to solve an item is central to the expression of individual differences on the Raven. One possible interpretation of these results is that working memory is important for Raven performance, but that it is not the number of "things" that should be held in memory when solving the Raven items that is responsible for the association between working memory tasks and Raven performance.

In the introduction to their 1984 article on geometric analogy tasks, Bethell-Fox, Lohman and Snow reminded the reader of the fact that one of the major result of the work in the information processing approach had been "to show that the assumption that the same model fit all subjects on a given task is not always tenable" (p. 206). This reminder seems to have been carefully ignored by supporters of the more recent models presented to this point. However, this idea that individuals may differ qualitatively as well as quantitatively is probably as appealing today as it was two decades ago. Although Bethell-Fox, Lohman, and Snow's (1984) study did not directly involve the Raven test, it shares enough similarities with the present study to be described here. One of the interesting aspects of this study is its focus on not only the number of elements in items (a forerunner of Carpenter et al.'s (1990) number of rule tokens) but also on response choice. Their study, an experimental manipulation of five potential difficulty factors (the number of elements in an item, the number of transformations, the type of transformation, the number of alternatives in the response choice, and the difficulty of response choices), revealed that item difficulty was a function of an interaction between the number of response choices and the number of elements in an item. Bethell-Fox et al. (1984), aided by an eye-movement behavior analysis of 28 subjects, interpreted these results in terms of two performance strategies described by Snow (1980). These two strategies, specifically hypothesized for multiple choice tests, were termed constructive matching, and response elimination. Constructive matching

involves the construction of an idealized answer which is then compared to the response alternatives of the response choice. Response elimination involves a process of feature comparison between elements of the problem and elements of the alternatives. It is presumed that this comparison is aimed at eliminating incorrect alternatives to arrive at the correct answer by default. Although qualitatively distinct, the two strategies were found to be associated with performance, constructive matching being used predominantly by higher ability subjects and response elimination being used predominantly by lower ability subjects. In the same way Bethell-Fox questioned the “one-model fits all” approach, however, they also questioned the notion that the individual model fits all of a person’s performance, and reported that the strategy chosen is also a function of item difficulty. They also related this observation of within-subject strategy shifting to common views of intelligence as adaptation. It is worth noting, however, that strategy shifting in their own study is essentially the low-ability subjects reverting to a response elimination strategy when items become too difficult, rather than a true adaptation to item characteristics.

Taking into account elements of the various models and findings reviewed in this introduction, the present study was designed to try to better understand, using eye-movement analysis, the causes of individual differences in Raven performance. Similar to Bethell-Fox et al.’s (1984) study, it takes into account the fact that the Raven is a multiple-choice test. Also similar to Bethell-Fox et al.’s (1984), Snow’s (1980) two performance strategies are hypothesized. Similar to the basic information-processing models and to the generation speed model, it includes speed as an important variable. Consistent with Unsworth and Engle (2005) and with Carpenter et al. (1990), it involves a detailed analysis of item difficulty.

Contrary to previous experimental studies, variables in the present study are not manipulated. This allows for a description of Raven performance as it occurs under the typical circumstances. This was not the case of Bethell-Fox et al.’s (1984) study, in which the findings might have been a product of the level of variable manipulation. Nor was it the case of Verguts et al. (2000), whose generation task might or might not reflect processes actually taking place in the Raven test.

Compared with Bethell-Fox et al.’s (1984) study, the present study has the advantage of more detailed eye-movement tracking technology. The eye-movement analysis they used was limited to fixation counts and

fixation sequence orders. Although this was sufficient to support the distinction between the two hypothesized strategies, recent developments in eye-movement tracking now allow us to record subject behavior in greater detail.

Following a suggestion made by Bors and Vigneau (2003), a clear distinction is maintained in the present study between general or aggregate data, and individual differences data. Aggregate—or item—and individual differences data indeed correspond to two levels of performance analysis which sometimes coincide, and sometimes do not. Even in cases where aggregate data do coincide with individual differences data, the correspondence may still be accidental, as can be exemplified by Bors and Vigneau (2003) with respect to practice data, or by Carpenter et al.’s (1990) thesis of an individual differences working memory factor based on the association, at the aggregate level, between item difficulty and memory load (number of rule instances). Keeping this distinction in mind, the result and the discussion will be organised in two separate sections dealing in turn with aggregate (item differences) and differential (individual differences) findings.

Beside the usual performance and latency measures, in the present study several eye-movement measures are developed to operationalize various aspects of performance (see also the Method below). These measures can be grouped into three categories: measures of alternation between interest areas, time on interest areas, and measures of time distribution across the matrix cells. The measures of alternation between interest areas are alternation counts similar to those used by Bethell-Fox et al. (1984). They allow for a replication, this time using the Raven, of the finding of two performance strategies: a high number of alternations indicating a heavier reliance on a response elimination strategy, and a small number of alternations being indicative of a constructive matching strategy. The latency between the beginning of item examination and the first alternation between interest areas, reflecting how quickly subjects abandon their initial examination of the matrix and look at the response choices, is a related strategic index. Longer latencies are indicative of a constructive matching strategy and shorter latencies are indicative of a response elimination strategy. Time on interest areas—distinguishing the time that the subject examines the matrix and the time that he or she examines the response choices—offers a complementary test of the same strategy differentiating hypothesis. Here, constructive matching would be inferred from a high proportion of time spent

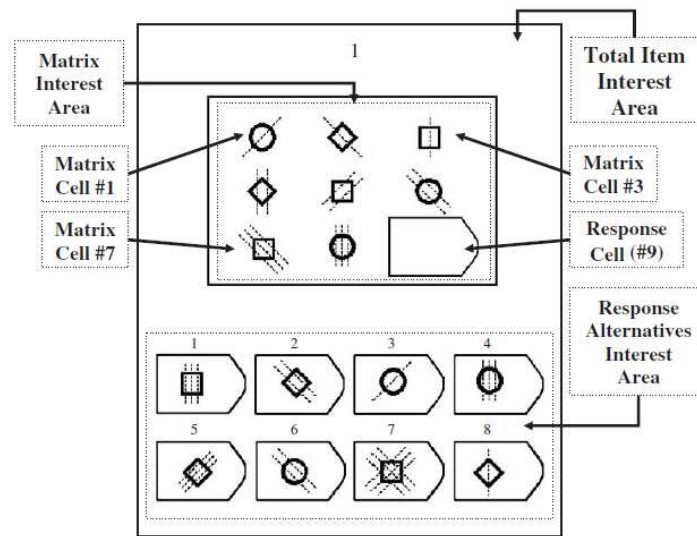


Fig. 1. Matrix cells and interest areas of an SAPM item.

examining the matrix, whereas response elimination would be inferred from a high proportion of time spent examining the response choice. Measures of time distribution across matrix cells take the logic of qualitative individual differences to another level. There is some suggestion that individuals vary in the amount of time they dedicate to the examination of each of the cells in the matrix. In particular, we suspect that some subjects tend to limit their analysis of the matrix to cells adjacent to the empty cell. The measures of time distribution across matrix cells provide the indices necessary to test such qualitative differences by contrasting two critical sub-areas of the matrix: the combination of the last row (cell numbers 7, 8, 9) and the last column (cell numbers 3, 6, 9) versus a combination of the off-row and off-column cells 1, 2, 4 and 5 (see Fig. 1). It is hypothesized that subjects who tend to bias their examination of the matrix cells in favor of cells in the column and the row directly associated with the response cell (right-most column and lower row) will tend to make more errors, compared to those who adopt a more evenly distributed examination of the matrix cells.

2. Method

2.1. Subjects

Fifty-five university students enrolled in various disciplines were recruited from undergraduate classes at the Université de Moncton. The 36 women and 19 men

ranged in age from 17 to 54 years (mean age=23.48 years, S.D.=6.95).

2.2. Materials

2.2.1. Short form of the Raven's Advanced Progressive Matrices test (SAPM)

In the present study, a computerized short-form version of the original APM test (Raven, Court, & Raven, 1988) was used. This particular short form was comprised of 14 items (8, 9, 12, 13, 17, 18, 21, 22, 24, 27, 30, 32, 33, and 34) extracted from the original 36-item Set II of the APM. These items, used in a previous study by Vigneau and Bors (2001), were selected to represent the various types of items and a broad range of difficulties. Such short forms of the APM, while significantly reducing administration time, have been found to retain the psychometric properties of the original version of the test, most importantly its predictive validity (Bors and Stokes, 1998). In the present computerized version, items were digitalized so as to correspond as much as possible to their paper and pencil counterparts. More specifically, both the matrix and the response choice were displayed simultaneously on the screen, in a black on white presentation. The sizes of the displayed items were approximately 10% larger on the screen than they are in the printed version. Analogous to the printed version, the item 9 (3x3) cell matrix was displayed in the top part of the screen and the numbered eight response alternatives were displayed in two rows of four choices in the bottom portion (see Fig. 1).

2.2.2. Eye-movement tracking

The 14 computerized SAPM items were integrated to an SR Research Ltd. EyeLink II system (2002a). This system sampled and recorded the movements and fixations of the subjects' pupils as they scanned the item's matrices and response choices. The EyeLink headband consists of two high-speed cameras sampling 250 images per second for each eye. A third camera tracks four infrared markers mounted on the 17-in. SVGA display monitor. This allows compensation for small head movements and eliminates the need for a chin rest or bite bar. Although the cameras tracked the movements of both eyes, the recordings and subsequent measures in this study are monocular (only the data from the best-calibrated eye were used). Pupil and marker positions were used to compute gaze position with an average accuracy of 0.5° or better. Saccades were detected by the EyeLink system, with the velocity threshold set to $30^\circ/\text{s}$ and the acceleration threshold set to $8000^\circ/\text{s}^2$.

2.3. Procedure

Using the original printed version, subjects were first familiarized with the APM test. Standard instructions were read by the experimenter and the subjects completed the first two items from the original APM Set I as practice items. There is evidence that there is little difference, if any, in the performance on short forms of the APM between those subjects who are administered all 12 practice items of Set I and those who are administered only the first two of those 12 items (Bors and Stokes, 1998).

Subjects were then seated on a chair with their face approximately 15 in. away from the eye-movement tracking system computer monitor in a dimly lit room (8 ft \times 10 ft). The system's headband was adjusted on the subjects and the system calibrated according to the EyeLink II system standard procedures. The calibration and validation procedure was repeated until satisfactory levels were reached. The APM standard instructions were again read by the experimenter and the subjects completed the same two practice items from Set I, this time on the computer. Each of the two practice items and the 14 test items began with the subject focusing on a fixation point in the center of the screen. Pressing the spacebar on the keyboard while gazing at the fixation point initiated the presentation of the item. This procedure ensured that all subjects began their visual inspection of all items from the same point on the screen.

After inspecting the matrix and deciding on a response, subjects gave their response by gazing at

their choice alternative for 10 s, then pressing a button on a joystick interfaced with the system to confirm this response. Response confirmation also initiated the presentation of the fixation point for the next item. After completion of the two practice items, the subject was left alone in the room to complete the test. Subjects were given unlimited time to complete all items.

2.4. Measures

SR Research Ltd. (2002b) EyeLink II Data Viewer software package was used to compute various latencies and measures to describe basic eye movements and fixations.

2.4.1. Latency measures

Item Latency was computed as the total time (in seconds) elapsed from the onset of the item's display until a response has been made (onset of the final response gaze at the chosen alternative). The sum of Item Latencies across the 14 test items is the *Total Test Latency*.

2.4.2. Time on interest areas

Item Latency was decomposed, for each item, into two partial time measures: *Time-on-Matrix* and *Time-on-Alternatives*. Time-on-Matrix for any given item is the total time during which the subject's gaze was within the perimeters of the matrix, whereas Time-on-Alternatives is the total time during which the subject's gaze was within the perimeters of the response alternatives. Worth noting is the fact that Time-on-Matrix and Time-on-Alternatives do not sum to Item Latency, given that there were times during a subject's examination of the items when he or she was focused on neither the matrix nor the response choices. Again, a total Time-on-Matrix and a total Time-on-Alternatives for the test have been computed as sum of each of these measures across all 14 test items. Additionally, standardized measures were derived. *Proportional Time-on-Matrix* for any given item was computed as Time-on-Matrix for this item divided by the corresponding Item Latency. Similarly, *Proportional Time-on-Alternatives* was computed as Time-on-Alternatives for each item divided by the corresponding Item Latencies. Both these measures were averaged across the 14 items to produce an average Proportional Time-on-Matrix and an average Proportional Time-on-Alternatives for the test.

2.4.3. Measures of alternation between interest areas

Number-of-Toggles was defined as the total number of times the subject's gaze moved from one interest area

to the other (from the matrix area to the response alternatives area or vice versa). To reduce possible confounds with latency, *Rate-of-Toggling* was defined as the Number-of-Toggles for an item divided by the corresponding Item Latency. Averaging across all 14 items produced an average Rate-of-Toggling for the test. An additional measure of alternation between interest areas is the Latency-to-First-Toggle, which was defined as the latency from the onset of the displayed item to the subject's first saccade to the response alternatives area. Averaging across all 14 items produced an average Latency-to-First-Toggle for the test.

2.4.4. Measures of time distribution across the matrix cells

Given its potentially central role for performance, Time-on-Matrix (the time during which the subject's gaze was within the perimeters of the matrix interest area) was further analysed using a measure constructed to index the distribution of time among the nine cells of the matrix. This index, the *Matrix Time Distribution Index*, reflects the distinction between partial and full matrix analysis as presented in the Introduction. The Matrix Time Distribution Index was computed, for each item, as the proportion of time on cells 3, 6, 7, 8 and 9, relative to the Time-on-Matrix, subtracted from the proportion of time on cells 1, 2, 4 and 5, relative to the Time-on-Matrix. Negative values of this difference score reflect the fact that gaze was mainly directed at the last column and the last row, arguably reflecting partial analysis, whereas values near zero indicate an even distribution of gaze time across the matrix cells, arguably reflecting a more complete analysis of the matrix. Averaging across the 14 test items produced an average Matrix Time Distribution Index for the test.

3. Results

3.1. Item differences

Table 1 contains a by-item summary of the accuracy performance and of the eye movement measures. Item difficulties (expressed as p values, the proportion of the subjects in the sample who correctly answered the item) ranged from 40% (item no. 9) to 95% (item no. 2). Also as seen from the table, averaging across the 55 subjects, Item Latency ($M=79.092$ s, $S.D.=42.442$) varied considerably across the 14 items, with subjects, not unexpectedly, generally spending more time on the more difficult items, $r=-0.87$. It can also be seen that the Time-on-Matrix ($M=67.167$ s, $S.D.=37.510$) also

varied substantially over the 14 items. Again, subjects tended to spend more time scrutinizing the matrix on the relatively more difficult items, $r=-0.84$. Again, not unexpectedly, the same was true for the Time-on-Alternatives ($M=11.960$ s, $S.D.=5.872$, $r=-0.87$). As we would have expected, as the items became more difficult, subjects tended to spend more time examining both the matrix and the response choices. As also can be seen from Table 1, however, there was little change in the Proportional Time-on-Matrix across the 14 items ($M=84.0\%$, $S.D.=4.1$) or in its complement, the Proportional Time-on-Alternatives ($M=16.2\%$, $S.D.=4.0$). Thus, although the amount of time that subjects take to inspect the matrix and the response choices increases with difficulty, the distribution of the proportions of time allotted to the matrix and the response choice was not significantly related to increased difficulty, $r=0.17$ and $r=-0.12$, respectively.

The Number-of-Toggles indicates the number of times the subject's gaze moved back and forth between the matrix area and the response alternatives area. As can be seen from Table 1, the Number-of-Toggles ($M=20.72$, $S.D.=8.85$) varied systematically with difficulty ($r=-0.83$), with increased relative difficulty being related to increased toggling. When the number of toggles was standardized on Item Latency, the resulting Rate-of-Toggling ($M=0.294$ toggles per second, $S.D.=0.059$) was no longer found to be related to difficulty, $r=0.41$, n.s.

Latency-to-First-Toggle indicates how quickly subjects abandon their initial examination of the matrix and look at the response choices, that is, how soon they make the first toggle. As seen in Table 1, Latency-to-First-Toggle ($M=0.017$ s, $S.D.=0.096$) was moderately related to item difficulty, $r=-0.60$. In general, the greater the difficulty, the longer the subjects examined the matrix before toggling down to make their initial inspection of the response choices.

3.2. Individual differences

The mean SAPM score in this sample of 55 university students was 8.75 ($S.D.=2.74$, range=3 to 14). The scores are normally distributed (skewness=-0.22, kurtosis=-0.53, Shapiro-Wilk's test of normality=0.97, n.s.) and present no risk of restricted range attenuating any correlations. The mean total time subjects spent on the 14 items was 18.45 min ($S.D.=8.95$). Although the average total time that the subjects spent on each item was related to the item's difficulty, total time that a subject spent on the items was found to be unrelated to the subject's SAPM score, $r=0.03$, n.s.

Table 1
Descriptive statistics of measures for each SAPM test item ($N=55$)

	Item													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Percent correct (p)	81.8 (38.9)	94.6 (22.9)	72.7 (44.9)	69.1 (46.6)	80.0 (40.4)	70.9 (45.8)	80.0 (40.4)	58.2 (49.8)	40.0 (49.4)	54.6 (50.3)	41.8 (49.8)	40.0 (49.4)	43.6 (50.1)	47.3 (50.4)
Item latency	37,072 (36,805)	41,641 (23,948)	40,156 (38,438)	58,086 (42,245)	35,957 (30,817)	50,886 (33,002)	55,966 (29,966)	80,046 (91,355)	102,746 (73,816)	79,973 (70,977)	166,228 (137,323)	124,119 (83,767)	148,936 (114,367)	85,481 (66,658)
Time on Matrix	31,768 (32,458)	36,599 (21,480)	35,102 (33,410)	45,965 (32,130)	30,863 (25,806)	40,375 (27,875)	46,066 (26,064)	71,077 (86,311)	84,322 (63,204)	67,244 (65,263)	142,921 (124,543)	107,747 (74,446)	133,867 (105,339)	66,425 (59,450)
Proportional Time on Matrix	0.86 (0.09)	0.88 (0.08)	0.88 (0.07)	0.80 (0.08)	0.86 (0.07)	0.78 (0.11)	0.81 (0.09)	0.88 (0.08)	0.81 (0.10)	0.82 (0.09)	0.84 (0.07)	0.86 (0.07)	0.89 (0.06)	0.76 (0.09)
Time on Alternatives	5294 (5645)	5460 (5693)	5054 (6383)	12121 (13,264)	5094 (5685)	10,512 (7356)	9902 (6576)	8969 (8980)	18,515 (16,806)	12,729 (9248)	23,304 (18,526)	16,372 (13,569)	15,068 (13,573)	19,038 (11,747)
Proportional Time on Alternatives	0.14 (0.09)	0.14 (0.16)	0.12 (0.07)	0.20 (0.08)	0.14 (0.07)	0.22 (0.11)	0.18 (0.09)	0.12 (0.08)	0.19 (0.10)	0.18 (0.09)	0.16 (0.07)	0.14 (0.07)	0.11 (0.06)	0.24 (0.09)
Number of Toggles	10,69 (9.89)	10,98 (10.01)	9,98 (11.68)	20,35 (26.15)	11,25 (10.65)	18,09 (12.08)	19,67 (11.75)	17,22 (18.53)	28,87 (26.88)	22,24 (17.30)	41,27 (40.49)	25,05 (24.27)	25,93 (24.26)	28,49 (17.27)
Rate of Toggling	0.322 (0.207)	0.279 (0.178)	0.248 (0.165)	0.332 (0.163)	0.332 (0.187)	0.375 (0.180)	0.367 (0.178)	0.227 (0.161)	0.296 (0.147)	0.301 (0.150)	0.279 (0.161)	0.214 (0.126)	0.187 (0.098)	0.362 (0.149)
Latency to First Toggle	7.48 (6.90)	16.70 (17.09)	11.86 (9.09)	15.05 (14.59)	11.12 (8.23)	11.84 (10.79)	11.94 (12.00)	22.34 (18.63)	30.18 (28.84)	11.07 (11.67)	17.09 (24.29)	23.80 (25.49)	41.75 (45.96)	11.26 (11.42)
Matrix Time Distribution Index	0.028 (0.270)	0.006 (0.241)	0.124 (0.206)	0.016 (0.201)	0.103 (0.212)	0.005 (0.212)	-0.068 (0.197)	0.197 (0.222)	-0.133 (0.239)	0.248 (0.181)	0.109 (0.202)	0.044 (0.220)	0.118 (0.220)	0.039 (0.211)

Latencies and time are in seconds. Standard deviations are in brackets. See text for a description of the variables.

The same was found also to be the case for Time-on-Matrix. Whereas the average time that subjects spent investigating each item's matrix was related to the item's relative difficulty, the total time a subject spent on the matrices was unrelated to his or her SAPM score, $r=0.08$. Similarly, although the average time the subjects spent examining the response choices (Time-on-Alternatives) was related to item difficulty, the time spent examining the response choices was not significantly related to SAPM score, $r=-0.25$.

On the other hand, whereas the proportion of time that subjects spent investigating each item's matrix was found to be unrelated to the item's relative difficulty, the proportion of total time a subject spent inspecting the matrices—Proportional Time-on-Matrix—was significantly correlated with their SAPM score, $r=0.48$. That is, those subjects who spent proportionately more of their total time on the items inspecting the matrices tended to have higher SAPM scores than did those who spent proportionately less of their total item time on the matrices. Being almost the exact arithmetic complement of Proportional Time-on-Matrix, the proportion of the time subjects spent on the response choices—Proportional Time-on-Alternatives—also significantly related to their SAPM score, $r=-0.44$. In this case, the more time subjects spent examining the response choices, the lower their SAPM score tended to be.

In addition to being related to relative item difficulties, Number-of-Toggles was found to be related to SAPM scores, $r=-0.27$. That is, those subjects who frequently alternated between the matrix and the response choice areas tended to have lower SAPM scores than did those who alternated less. When Number-of-Toggling was standardized on Item Latency, the resulting Rate-of-Toggling was still associated with SAPM scores, $r=-0.43$. Also a measure pertain-

ing to the alternation between the item interest areas, Latency-to-First-Toggle was also found to be correlated to SAPM scores, $r=0.41$, with subjects who waited longer before making their first inspection of the response choices tending to have the higher APM scores.

The Matrix Time Distribution Index, reflecting the degree to which matrix inspection used all or only part of the matrix cells, was also found to be related to SAPM scores, $r=0.49$. Here, the subjects who tended to distribute more evenly their inspection across the matrix cells tended to have higher SAPM scores than those who concentrated on the cells of the third row and the last column.

The correlations among the various eye-movement measures and the SAPM scores are presented in Table 2, along with the internal consistency reliability coefficients associated with those measures.

All of the examined eye-movement behavior measures were significantly related to SAPM scores. To explore the extent to which these variables may be redundant with respect to their association with SAPM score in a first step toward developing a model of APM performance, various multiple regression analyses were conducted. A stepwise model with SAPM score as dependent variable and all the reported eye-tracking measures as independent variables revealed two significant predictors with independent contribution (Matrix Time Distribution Index and Proportional Time-on-Matrix: Model 1), multiple $r=0.57$ ($R^2=0.32$, adjusted $R^2=0.29$). Another model (Model 2) explaining a similar portion of SAPM variance included Matrix Time Distribution Index and Latency-to-First-Toggle (multiple $r=0.55$, $R^2=0.30$, adjusted $R^2=0.28$). The regression coefficients for these two models, as well as the various correlation coefficients associated with the predictor variables, are presented in Table 3.

Table 2
Correlations among the SAPM scores, latency measures, and the eye-movement measures ($N=55$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	SAPM	IL	TM	TA	PTM	PTA	NTOG	RTOG	LFT	MTDI
1. SAPM score (0.66)	1.00	0.03	0.08	-0.25	0.48*	-0.44*	-0.27*	-0.43*	0.41*	0.49*
2. Item Latency (0.81)		1.00	0.99*	0.64*	0.30*	-0.30*	0.55*	-0.40*	0.47*	0.22
3. Time-on-Matrix (0.82)			1.00	0.54*	0.39*	-0.39*	0.45*	-0.47*	0.51*	0.25
4. Time-on-Alternatives (0.78)				1.00	-0.37*	0.36*	0.92*	0.18	-0.01	-0.05
5. Proportional Time-on Matrix (0.87)					1.00	-0.98*	-0.32*	-0.79*	-0.59*	0.46*
6. Proportional Time-on-Alternatives (0.85)						1.00	0.31*	0.78*	-0.58*	-0.44*
7. Number of Toggles (0.77)							1.00	0.35*	-0.11	-0.07
8. Rate of Toggling (0.88)								1.00	-0.69*	-0.47*
9. Latency to First Toggle (0.82)									1.00	0.32*
10. Matrix Time Distribution Index (0.91)										1.00

* $p<0.05$. Cronbach's coefficient alpha in brackets (based on 14 SAPM items for all variables).

Table 3
Four regression models to predict SAPM scores

	Beta	<i>t</i>	Sig.	Correlation coefficients			Tolerance
				Zero-order	Partial	Semi-partial	
<i>Model 1 (R² = 0.32, adjusted R² = 0.29)</i>							
Matrix Time Distribution Index	0.34	2.60	0.01	0.49	0.34	0.29	0.79
Proportional Time-on-Matrix	0.33	2.54	0.01	0.48	0.33	0.29	0.79
<i>Model 2 (R² = 0.30, adjusted R² = 0.28)</i>							
Matrix Time Distribution Index	0.40	3.24	0.00	0.49	0.41	0.38	0.90
Latency-to-First-Toggle	0.28	2.27	0.03	0.41	0.30	0.26	0.90
<i>Model 3 (R² = 0.49, adjusted R² = 0.46)</i>							
Matrix Time Distribution Index	0.33	2.96	0.01	0.49	0.38	0.30	0.79
Proportional Time-on-Matrix	0.39	3.41	0.00	0.48	0.43	0.34	0.78
Latency on Easy Items	-0.42	-4.15	0.00	-0.34	-0.50	-0.41	0.98
<i>Model 4 (R² = 0.51, adjusted R² = 0.48)</i>							
Matrix Time Distribution Index	0.35	3.28	0.00	0.49	0.42	0.32	0.84
Number of Toggles on Easy Items	-0.48	-3.72	0.00	-0.64	-0.46	-0.37	0.57
Latency on Easy Items	-0.09	-0.74	0.46	-0.34	-0.10	-0.07	0.62

3.3. Latency on easy items

As reported above, the time that subjects spent on SAPM items was unrelated to their SAPM scores, $r=0.03$, n.s. The average item latency computed on easy items only, however, was found to be significantly related to SAPM scores, $r=-0.34$. This new variable, the Latency on Easy Items, is the average Item Latency for items with p values greater than 80% (item nos. 1, 2, 5 and 7). It is used here, despite its low internal consistency reliability (Cronbach's $\alpha=0.51$), to reflect findings (Neubauer, 1990) and recommendations (Lavergne, 1997; Lavergne & Vigneau, 1997) in the area.

When added as a predictor variable to the two variables already in the model after the stepwise analysis (Model 3), Latency on Easy Items significantly contributed additional unique variance to the prediction of SAPM scores (incremental $R^2=0.17$, $F(1,51)=17.19$, $p<0.05$). Particularly interesting in this case is the suppression effect revealed by this analysis. As can be observed from the coefficients reported in Table 3, whereas the zero-order correlation between Latency on Easy Items and SAPM scores was $r=-0.34$, the effect of this independent variable was increased when controlling for the eye-tracking variables in the model (partial $r=-0.50$).

The effect found for Latency on Easy Items in the prediction of SAPM scores was typical in magnitude. It did not absorb the effect of the eye-tracking variables already included in the model, however, nor, on the other hand, was its effect absorbed by the eye-tracking

indicators. It could therefore be concluded that the speed and the strategic indicators have significant and complementary variance to contribute to the prediction of SAPM scores. However, the low reliability of the Latency on Easy Items should not be ignored. Low reliability means that the findings obtained in the present study may in a relatively large proportion be due to chance, and that they may be difficult to replicate with other samples. By contrast, all the strategic indicators derived to this point from the eye-movement measures have very satisfactory reliabilities.

In fact, other low reliability measures can be constructed which also have a significant association with SAPM scores. One such measure is the Number of Toggles on Easy Items (the average Number of Toggles across items 1, 2, 5 and 7, Cronbach's $\alpha=0.30$). From all the variables used in the present study, Number of Toggles on Easy Items is the best single predictor of SAPM scores, $r=-0.67$. Furthermore, controlling for Number of Toggles on Easy Items attenuated the correlation between Latency on Easy Items and SAPM from $r=-0.34$ to virtually zero (partial $r=0.03$, n.s.). Predictably, when used in a stepwise regression analysis, Number of Toggles on Easy Items became the main independent variable in the model (along with Matrix Time Distribution Index, multiple $r=0.71$, $R^2=0.50$, adjusted $R^2=0.48$, $F(2,52)=26.32$, $p<0.05$), leaving no room for Latency on Easy Items in the prediction of SAPM scores (see Table 3 for a standard regression model in which Matrix Time Distribution Index, Number of Toggles on Easy Items, and Latency on Easy Items were entered as predictor variables). As

was the case with Latency on Easy Items, however, the low reliability of this apparently important strategic indicator should be kept in mind.

4. Discussion

Starting out with the same object (Raven's test), the same methodology (eye-movement tracking) and the same objective (explaining intelligent performance) as Carpenter et al.'s (1990) well-known contribution, the present study arrived at strikingly different conclusions. Central to these differences in conclusions is the fact that our study examined qualitative differences as well as quantitative differences, and took into account the distinction between two distinct levels of analysis—aggregate data and individual differences data. At the aggregate level, items conformed to expectations in terms of their associations with the various performance and eye-movement measures. At the level of individual differences, although the typical correlation between speed and performance was found, significant strategic correlates were also revealed, both the subject's approach to the matrix and to the response choices appearing as important aspects of performance.

4.1. Item differences: what creates item difficulty?

The association of performance and eye-movement measures with item difficulties was consistent with expectations. Item difficulty was found to be related to solution latency, matrix inspection, response-choice inspection, the number of alternation between interest areas, and latency to first alternation. A simple transposition of these aggregate results to the level of individual differences would suggest that all these variables relate to intelligence—that high Raven performance is associated with reduced latency, reduced matrix inspection, reduces response-choice inspection, reduced number of alternation between interest areas, and reduced latency to first alternation. This was not the case, as will be discussed in the next section. However, it could be argued that these associations in fact reflect the fact that these measures are all consequences of item difficulty, and that it is difficulty that creates the observed effects. But what creates difficulty? According to Carpenter et al. (1990), the number of rules and rule instances required to solve the item is a good candidate. Indeed, their results showed a strong association between the item rule structure that Carpenter et al. (1990) suggested and item difficulty, $r=0.75$. Calculated on the data of the present study, the correlation between item difficulty and the number of rules and rule

instances (as determined by Carpenter et al., 1990), although smaller in magnitude, was also substantial, $r=0.58$, $p<0.05$, one-tailed (based on 10 items). Thus, a simple transposition of these aggregate results to the level of individual differences also seems possible here. It would suggest that, since difficulty seems to be largely determined by the memory load associated with the task of dealing with several rules and rule instances, individual differences on the test would be determined in large part by individual differences in their ability to deal with several rules and rule instances—working memory capacity. However, such an inference concerning individual differences mechanisms from aggregate results may be unwarranted—especially in the presence of qualitative differences at the individual differences level.

4.2. Individual differences: toward a multifaceted model of intelligence

The new level of detail in analysis permitted by the measurement of eye-movement patterns provided evidence allowing us to propose a model in which individual differences in intelligence are explained in terms of both a speed factor and strategic influences. Several strategic indices—in particular, Proportional Time-on-Matrix, the Matrix-Time-Distribution index and Latency-to-First-Toggle—emerged in the regression analyses as significant predictors of Raven performance. This is consistent with a view of intelligence that takes into account qualitative individual differences. Specifically, both the contribution of Proportional Time-on-Matrix, which reflects the individual bias in terms of using matrix information versus using response-choice information during item inspection, and the contribution of Latency-to-First-Toggle support Bethell-Fox et al.'s distinction between a constructive matching strategy and a response elimination strategy. This is evidence supporting the notion that, in response-choice tests, response choice is used by lower ability subjects to achieve a solution by default. The positive association with intelligence of Latency-to-First-Toggle is also consistent with the view, classic since Sternberg's (1977) development of the componential analysis of reasoning, that higher ability subjects are typically those who spend more time at the encoding phase of the process.

The contribution of the Matrix-Time-Distribution index to the prediction of intelligence takes the finding of qualitative differences to a new level: individuals vary qualitatively in terms of their inspection of the individual cells within the matrix. This qualitative

difference is conceptually and statistically distinct from the difference between constructive matching and response elimination. Also, contrary to the latter distinction, there is no reason to believe that the contribution to the prediction of intelligence of inspection bias of individual cells would be limited to response-choice tests. This new qualitative distinction also tells us that individuals do not only do things differently when asked to solve intelligence test items: they also do different things. More precisely, high- and low-scoring subjects may have different objectives when inspecting matrices, high-scoring individuals trying to take into account all the information provided by each cell and low-scoring individuals biasing their inspection mainly toward adjacent cells (last row and last column).

Our model of intelligent performance also includes a speed factor. In fact, the contribution of Latency-on-Easy-Items to the prediction of Raven performance is further revealed by its inclusion in the prediction model along with the strategic variables—an interesting instance of a suppression effect. This result could be considered as supportive evidence for basic information processing views of intelligence, would it not be for the fact that we do not know what a speed variable exactly represents. In any case, these results taken together provide supportive evidence for a model of intelligence integrating both qualitative and quantitative influences. In fact, it is interesting to note that our model integrates two findings seeming at first incompatible: the *positive* correlation between intelligence and Latency-to-First-Toggle and its *negative* correlation with Item Latency. This constitutes another argument in favor of a multifaceted model: at one level, spending more time encoding critical features is an appropriate approach to solving Raven items; at another level, not spending too much time on (easy) items is a feature of efficient performance that emerges even more clearly *when the variability in encoding time is controlled*.

Several researchers have already proposed models of individual differences that take into account differences of kind as well as differences in quantity. One such model is Bethell-Fox et al.'s (1984). Other models include Sternberg and Weil (1980)'s (distinction between linguistic, spatial and mixed strategies), Rozenwajg and Huteau's (1996) (distinction between global, analytic and synthetic strategies) and Kyllonen, Lohman, and Woltz's (1984) model, in which several strategies are assumed for various components of the information-processing sequence. Similar ideas can also be found in the area of cognitive style (distinction

between impulsivity and reflexivity, or between field dependence and field independence).

One of the difficulties with most models that include a qualitative distinction of strategies is that a clear separation between the assumed types of processing is rarely supported. Bethell-Fox et al. (1984) represented an important advance in questioning not only the idea of a single model for all subjects, but also the assumption of a single model for a given individual. Their observation of a substantial amount of within-subject strategy switching, however, seems incompatible with our own results of very high reliabilities of the strategic indices. Indeed, high reliabilities support the idea of a high consistency of individual differences in strategy use across test items. How can these competing results be reconciled? One avenue that should be explored concerns the nature of qualitative differences. Typically, qualitative differences are conceptualized in terms of categories. However, the measures used in our study indexed qualitative differences quantitatively: it is the extent to which subjects bias their visual inspection of the items toward the matrix area, the extent to which they distribute the inspection evenly across the matrix, that reflect strategies. It is the magnitude of those biases that is related to intelligent performance. But at the same time, one cannot assume that various positions along such a continuum of biases represent similar approaches to problem solution, making them genuinely qualitative differences.

Acknowledgements

This research was supported by grants from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and from the Social Sciences and Humanities Research Council of Canada (SSHRC).

References

- Bethell-Fox, C. E., Lohman, D. F., & Snow, R. E. (1984). Adaptive reasoning: Componential and eye movement analysis of geometric analogy performance. *Intelligence*, *8*, 205–238.
- Bors, D. A., MacLeod, C. M., & Forrin, B. (1993). Eliminating the IQ-IT correlation by eliminating an experimental confound. *Intelligence*, *17*, 475–500.
- Bors, D. A., & Stokes, T. L. (1998). Raven's Advanced Progressive Matrices: Norms for first-year university students and the development of a short form. *Educational and Psychological Measurement*, *58*, 382–398.
- Bors, D. A., & Vigneau, F. (2003). The effect of practice on Raven's Progressive Matrices. *Learning and Individual Differences*, *13*, 291–312.
- Carpenter, P. A., Just, M. A., & Shell, P. (1990). What one intelligence test measures: A theoretical account of the processing in the Raven Progressive Matrices test. *Psychological Review*, *97*, 404–431.

- Detterman, D. K. (1987). What does reaction time tell us about intelligence? In P. A. Vernon (Ed.), *Speed of information processing and intelligence* (pp. 177–200). Norwood, NJ: Ablex.
- Jensen, A. R. (1987). Individual differences in the Hick paradigm. In P. A. Vernon (Ed.), *Speed of information processing and intelligence* (pp. 101–175). Norwood, NJ: Ablex.
- Kyllonen, P. C., Lohman, D. F., & Woltz, D. J. (1984). Componential modeling of alternative strategies for performing spatial tasks. *Journal of Educational Psychology*, *76*, 1325–1345.
- Lavergne, C. (1997). *La vitesse d'exécution à des tests d'aptitudes comme indice de l'habileté intellectuelle*. Unpublished doctoral dissertation, Université Laval, Quebec City.
- Lavergne, C., & Vigneau, F. (1997). Response speed on aptitude tests as an index of intellectual performance: A developmental perspective. *Personality and Individual Differences*, *23*, 283–290.
- Longstreth, L. E. (1984). Jensen's reaction-time investigations of intelligence: A critique. *Intelligence*, *8*, 139–160.
- Neubauer, A. C. (1990). Speed of information processing in the Hick paradigm and response latencies in a psychometric intelligence test. *Personality and Individual Differences*, *11*, 147–152.
- Neubauer, A. C. (1995). *Intelligenz und Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung*. Springer-Verlag: Vienna.
- Raven, J. C., Court, J. H., & Raven, J. (1988). *Manual for Raven's Progressive Matrices and Vocabulary Scales. Section 4: Advanced Progressive Matrices, Sets I and II (1988 edition)*. Oxford: Oxford Psychologists Press.
- Rozencwajg, P., & Huteau, M. (1996). Les stratégies globale, analytique et synthétique dans les cubes de Kohs. *Psychologie Française*, *41*, 57–64.
- Snow, R. E. (1980). Aptitude processes. In R. E. Snow, P. -A. Federico, & W. E. Montague (Eds.), *Aptitude, learning, and instruction: Cognitive process analyses of aptitude, vol. 1* (pp. 27–63). Hillsdale NJ: Erlbaum.
- SR Research Ltd. (2002a). *EyeLink script processor user manual*. Mississauga, ON: SR Research Ltd.
- SR Research Ltd. (2002b). *EyeLink data viewer user manual*. Mississauga, ON: SR Research Ltd.
- Sternberg, R. J. (1977). *Intelligence, information processing, and analogical reasoning: The componential analysis of human abilities*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Sternberg, R. J., & Weil, E. M. (1980). An aptitude \times strategy interaction in linear syllogistic reasoning. *Journal of Educational Psychology*, *72*, 226–239.
- Unsworth, N., & Engle, R. W. (2005). Working memory capacity and fluid abilities: Examining the correlation between operation span and Raven. *Intelligence*, *33*, 67–81.
- Verguts, A., De Bock, P., & Maris, E. (2000). Generation speed in Raven's Progressive Matrices test. *Intelligence*, *27*, 329–345.
- Vernon, P. A. (Ed.) (1987). *Speed of information processing and intelligence*. Norwood, NJ: Ablex.
- Vigneau, F., & Bors, D. A. (2001). *Visuospatial and verbal-analytic processes in Raven's Progressive Matrices performance*. XI Meeting of the Canadian Society for Brain, Behaviour, and Cognitive Science (CSBBCS), Université Laval, Quebec City.