



HAL
open science

Propriétés analogiques des représentations mentales de l'espace : Etude comparative auprès de personnes voyantes et non-voyantes

Amandine Afonso Jaco

► **To cite this version:**

Amandine Afonso Jaco. Propriétés analogiques des représentations mentales de l'espace : Etude comparative auprès de personnes voyantes et non-voyantes. Psychologie. Université Paris Sud - Paris XI, 2006. Français. NNT : . tel-00874760

HAL Id: tel-00874760

<https://theses.hal.science/tel-00874760>

Submitted on 18 Oct 2013

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

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



Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de
DOCTEUR en SCIENCES de L'UNIVERSITE PARIS XI – ORSAY
Discipline : SCIENCES COGNITIVES
Mention Psychologie Cognitive

Soutenue publiquement par

Amandine Afonso

Propriétés analogiques des représentations mentales de
l'espace : Etude comparative auprès de personnes
voyantes et non-voyantes

Thèse soutenue le 18 septembre 2006 devant le jury composé de :

Jean-Louis Vercher, Directeur de Recherche au CNRS (Président du jury)
Catherine Thinus-Blanc, Directeur de Recherche au CNRS (Rapporteur)
Cesare Cornoldi, Professeur (Rapporteur)
Michel Denis, Directeur de Recherche au CNRS (Examineur)
Philippe Tarroux, Professeur, (Directeur de thèse)

Remerciements

Ce travail n'aurait pas pu voir le jour sans l'implication de nombreuses personnes que je souhaite remercier aujourd'hui :

En premier lieu, mon directeur de thèse, Philippe Tarrow, d'avoir accepté après mon DEA de prendre la direction de ce travail. Je le remercie tout particulièrement, pour sa disponibilité et pour les discussions que nous avons pu avoir, m'ayant permis d'ouvrir mon sujet sur les problèmes de perception et sur le paradigme des contingences sensorimotrices. Merci également d'avoir permis le bon déroulement de ma dernière expérimentation.

Michel Denis, de m'avoir fait partager dès l'année de mon DEA un sujet passionnant. Je le remercie notamment pour ses précieux conseils et suggestions durant ces années de thèse, mais également pour ses jugements très pertinents sur mon manuscrit. J'ai particulièrement apprécié de pouvoir bénéficier de sa rigueur scientifique dans les relectures d'articles comme dans la préparation de conférences.

Les membres de mon jury de thèse. Tout d'abord, Mr Jean-Louis Vercher, pour avoir accepté d'être président de mon jury de thèse, et pour ses commentaires lors de ma soutenance.

Mr. Cesare Cornoldi et Mme Catherine Thinus Blanc qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être rapporteur de mon travail, malgré la charge que cela impliquait. Je les remercie tout particulièrement pour le temps passé à évaluer mon manuscrit, mais également pour le grand intérêt de leurs remarques et la qualité de la discussion que nous avons pu échanger lors de ma soutenance.

Patrick Le Quere, directeur du laboratoire, pour m'avoir permis de bénéficier au cours de ma thèse et notamment pour la mise en place de ma dernière expérimentation de moyens, autant humains que financiers, très importants.

J'aimerais également témoigner ma sympathie et ma reconnaissance à Brian Katz qui a permis de donner une envergure particulière à mon travail de thèse, en me proposant de m'accompagner sur un projet alliant l'acoustique et l'étude du comportement. Merci pour ces innombrables discussions, et pour avoir tenu bon sur ce projet ambitieux.

Je remercie également Christian Jacquemin de s'être investi dans ce projet et de nous avoir permis d'avoir de très beaux rendu graphiques de ce travail.

Enfin, mes profonds remerciements vont à Alan Blum pour son soutien, et pour s'être autant investi dans ce travail que la pluridisciplinarité rendait aussi complexe que passionnant. Merci pour cette aventure, et pour tout le reste.

Je remercie ensuite très sincèrement Valérie Compan qui a su dès mes premières années universitaires susciter mon intérêt pour la recherche et pour l'enseignement au travers de la passion qu'elle n'a cessé de me transmettre depuis que j'ai eu la chance de la rencontrer en Licence. Pour cette passion, son soutien sans faille durant les aléas qui jalonnent une thèse et cette profonde amitié qui nous lie depuis notre rencontre dans les amphithéâtres de l'université de Bourgogne, je la remercie très chaleureusement.

Je voudrais ensuite adresser mes remerciements à Cédric Coussinet, pour son implication, son soutien et son amitié durant ces dernières années. Merci pour ces si nombreuses discussions qui ont permis d'approfondir l'ouverture pluridisciplinaire de mon travail, et pour m'avoir aiguillé sur certains choix et analyses de données. Je le remercie également d'avoir pris le temps de concevoir le support informatique de l'une de mes expérimentations.

Je voudrais aussi exprimer toute mon amitié et mes profonds remerciements à Stéphanie Busine, qui avec une patience angélique a répondu à la moindre de mes questions et interrogations sur les domaines qui la passionnent.

Ensuite, je voudrais remercier Sandrine Enault et Linda Bentaleb de m'avoir fait l'amitié de m'aider dans la toute dernière ligne droite de la rédaction. C'est à ce moment que ce soutien m'était le plus nécessaire !

J'aimerais également remercier Daniel Lerin, Pascal Desroches et Pierre Durand pour m'avoir aidé dans la réalisation de ma dernière expérimentation en réalité virtuelle, depuis sa mise en œuvre physique, jusqu'à la réalisation d'un DVD résumant les différentes parties de l'expérience.

Je souhaite remercier chaleureusement ici Mme Ligonnière et Mme Gispert qui chacune dans leur domaine, ont fait en sorte de préserver au mieux mes conditions de travail, pour que je puisse mener à son terme ce travail.

Je voudrais également remercier Annick Choisier pour son amitié, son écoute et ses précieux conseils durant ces dernières années, mais également pour avoir eu la gentillesse de prendre en charge la gestion des personnes non-voyantes désireuses d'assister à ma soutenance.

Plus généralement, j'aimerais adresser ici mes remerciements aux différents membres du LIMSI, qui de près ou de loin ont participé à mes expériences, en me faisant à chaque fois bénéficier de critiques constructives. Un énorme merci à tous ceux qui ont permis que cette thèse se passe dans les meilleures conditions... Un merci tout particulier pour Nada, pour sa bonne humeur et son amitié.

De la même manière, un très grand merci à mes ami(e)s, d'avoir eu la patience de comprendre mon implication dans ce travail, qui, nécessairement, m'a empêché d'être à leur égard aussi disponible que je l'aurais souhaité. Merci à Marjolaine, Maryse, Alan, Laurence, Katiou, Valérie, Laure, Pat, Stéphanie, Sébastien, Olivier et à tous ceux que j'oublie inévitablement...

Enfin, j'aimerais exprimer ma très grande gratitude et ma profonde reconnaissance aux personnes non-voyantes qui ont pris part à mes expérimentations. Auprès de vous, au-delà de votre enthousiasme pour les résultats et votre si généreuse implication dans mon travail, j'ai rencontré des personnes exceptionnelles, avec qui j'ai pu échanger des moments d'amitié et de discussions très riches. Merci d'avoir pris tout ce temps et cette énergie pour me permettre de mener à bien ces projets.

Pour terminer, je voudrais ici remercier très affectueusement mes parents, Dominique et Linda, ainsi que mes deux frères, Anthony et Daniel. Merci d'avoir toujours été là et de m'avoir soutenue dans les moments les plus difficiles et les plus passionnants qui ont jalonné ces dernières années. Je suis heureuse que vous ayez pu partager avec moi ce jour si important que fut celui de ma soutenance.

Je finirai en dédiant cette thèse, et tout ce travail à deux personnes qui me seront toujours des plus chères. A mon grand-père, qui est parti beaucoup trop tôt, et à ma petite Sophie, qui depuis mon adolescence a subtilement dessiné les chemins que j'allais emprunter...

Tables des Matières

Introduction générale	1
Partie I : Cadre Théorique	6
CHAPITRE 1. L'imagerie mentale dans la recherche sur la cognition.....	7
1.1. Développements théoriques.....	8
1.1.1. Théorie quasi-pictoriale.....	9
1.1.2. Approche fonctionnaliste ou propositionnaliste.....	10
1.1.3. Une approche de la perception active.....	11
1.2. Recherches expérimentales sur l'imagerie mentale.....	13
1.2.1. Données comportementales.....	14
1.2.2. Données en neuroimagerie.....	20
CHAPITRE 2 : Influence d'une privation sensorielle sur les processus d'imagerie mentale.....	24
2.1. La privation visuelle.....	24
2.1.1. Les personnes privées de vision	24
2.1.2. La notion de période critique.....	25
2.2. Conséquences de la privation visuelle précoce.....	27
2.2.1. Développement des autres modalités sensorielles.....	27
2.2.2. Développement psychologique	28
2.2.3. Développement cognitif.....	29
2.3. Recherches expérimentales sur l'imagerie mentale des personnes non-voyantes.....	31
2.3.1. Données comportementales.....	31
2.3.2. Données en neuroimagerie	33
CHAPITRE 3 : Résumé de la problématique et contribution expérimentale	
Adaptation pour des non-voyants de paradigmes expérimentaux testant l'imagerie mentale....	37

Partie II : Chapitres Expérimentaux	40
CHAPITRE 4 : Introduction à la partie expérimentale et problématique.....	41
CHAPITRE 5 : Exploration mentale de distances (<i>expérience 1</i>).....	43
5.1. Méthode.....	43
5.1.1. Participants.....	43
5.1.2. Matériel expérimental.....	44
5.1.3. Procédure.....	45
5.1.3.1. Questionnaire.....	46
5.1.3.2. Phase d'entraînement.....	46
5.1.3.3. Phase d'acquisition.....	47
5.1.3.4. Phase expérimentale.....	49
5.2. Analyse des résultats (<i>expérience 1</i>).....	51
5.2.1. Chez les participants voyants avec ou sans privation de vision.....	52
5.2.2. Chez les participants voyants privés de vision.....	53
5.2.3. Chez les participants non-voyants tardifs.....	54
5.2.4. Chez les participants non-voyants de naissance.....	55
5.3. Discussion.....	57
CHAPITRE 6 : Comparaison mentale de distances (<i>expérience 2</i>).....	60
6.1. Méthode.....	61
6.1.1. Participants.....	61
6.1.2. Matériel expérimental.....	61
6.1.3.	
Procédure.....	62
6.1.3.1. Principe.....	62
6.1.3.2. Questionnaire.....	62
6.1.3.3. Phase d'entraînement.....	62
6.1.3.4. Phase d'acquisition.....	63
6.1.3.5. Phase expérimental.....	63

6.2. Analyse des résultats.....	64
6.2.1. Analyse des pourcentages de réponses correctes.....	64
6.2.1.1. Chez les participants voyants avec ou sans privation de vision.....	64
6.2.1.2. Chez l'ensemble des participants.....	65
6.2.1.2.1. Analyse de la variable modalité d'acquisition	65
6.2.1.2.2. Analyse de la variable groupe	65
6.2.1.2.3 Analyse de la variable distance.....	66
6.2.1.2.4 Analyse de l'interaction entre les variables groupe et distance.....	67
6.2.1.3. Chez les participants voyants privés de vision.....	68
6.2.1.3.1. Analyse de la variable modalité d'acquisition.....	68
6.2.1.3.2. Analyse de la variable distance.....	69
6.2.1.3.3. Analyse de l'interaction des variables modalités et distances.....	69
6.2.1.4. Chez les participants non-voyants tardifs.....	70
6.2.1.4.1. Analyse de la variable modalité d'acquisition.....	70
6.2.1.4.2. Analyse de la variable distance.....	71
6.2.1.4.3. Analyse de l'interaction entre les variables modalités et distances.....	72
6.2.1.5. Chez les participants non-voyants de naissance.....	73
6.2.1.5.1. Analyse de la variable modalité d'acquisition.....	73
6.2.1.5.2. Analyse de la variable distance.....	74
6.2.1.5.3. Analyse de l'interaction des variables modalités et distances.....	75
6.2.1.6. Résumé des données issues de l'analyse des pourcentages de réponses correcte.	76
6.2.2. Analyse des temps de réponse.....	77
6.2.2.1. Chez les participants voyants avec ou sans privation de vision	77
6.2.2.2. Chez l'ensemble des participants.....	78
6.2.2.2.1. Analyse de la variable modalité d'acquisition.....	78
6.2.2.2.2. Analyse de la variable groupe.....	79
6.2.2.2.3. Analyse de la variable distance.....	80
6.2.2.2.4. Analyse de l'interaction entre les variables groupe et distance.....	81
6.2.2.3. Chez les participants voyants privés temporairement de vision.....	82

6.2.2.3.1. Analyse de la variable modalité d'acquisition.....	82
6.2.2.3.2. Analyse de la variable distance.....	82
6.2.2.3.3. Analyse de l'interaction des variables modalités et distances.....	83
6.2.2.4. Chez les participants non-voyants tardifs.....	84
6.2.2.4.1. Analyse de la variable modalité d'acquisition.....	84
6.2.2.4.2. Analyse de la variable distance	85
6.2.2.4.3. Analyse de l'interaction des variables modalités et distances.....	86
6.2.2.5. Chez les participants non-voyants de naissance.....	87
6.2.2.5.1. Analyse de la variable modalité d'acquisition.....	87
6.2.2.5.2. Analyse de la variable distance.....	88
6.2.2.5.3. Analyse de l'interaction des variables modalités et distances.....	88
6.2.2.6. Résumé des données issues des temps de réponse.....	89
6.2.3. Conclusion de <i>l'expérience 2</i>	90
6.3. Discussion.....	91
6.4. Bilan de <i>l'expérience 1</i> d'exploration mentale de distances, et de <i>l'expérience 2</i> de comparaison mentale de distances.....	95
CHAPITRE 7 : Apport de la Réalité Virtuelle dans l'étude du comportement humain.....	97
7.1. La Réalité Virtuelle	97
7.1.1. Réalité virtuelle audio : Recours à la synthèse binaurale.....	98
7.1.2. Réalité virtuelle audio : Evaluation des sources sonores présentes dans la scène.....	99
7.2. Réalité virtuelle et non-voyants.....	100
7.3. Contribution expérimentale : Etudes de l'imagerie mentale des non-voyants, mise en place d'une plate-forme de Réalité Virtuelle en audio 3D.....	101
7.3.1 Description de la plateforme.....	101
7.3.2. Description de l'architecture de l'environnement.....	102
7.3.3. Choix expérimentaux.....	104
7.3.3.1. Recueil des réponses des participants.....	104

7.3.3.2. Choix des HRTFs des participants.....	104
CHAPITRE 8 : Expérimentation en Réalité Virtuelle Audio 3D (<i>expérience 3</i>).....	105
8.1. Méthode.....	105
8.1.1. Participants.....	105
8.1.2. Matériel.....	105
8.1.2.1. Plateforme expérimentale.....	105
8.1.2.2. Composition de la scène virtuelle.....	106
8.1.3. Procédure.....	108
8.1.3.1. Phase préparatoire à l'immersion dans le monde virtuel.....	108
8.1.3.2. Phase d'apprentissage.....	109
8.1.3.3. Phase de vérification de l'apprentissage.....	110
8.1.4. Phase de test.....	111
8.1.4.1. Reconstruction de la scène initiale (tâche 1).....	111
8.1.4.2. Détection de modifications dans des variantes de la scène initiale (tâche 2)....	113
8.1.4.3. Exploration mentale de distances (tâche 3).....	113
8.1.4.4. Comparaison mentale de distances (tâche 4).....	114
8.2. Analyse des résultats.....	116
8.2.1. Reconstruction de la scène initiale (<i>tâche 1</i>).....	116
8.2.1.1. Erreur angulaire pour l'ensemble des groupes.....	117
8.2.1.2. Erreur de rayon pour l'ensemble des groupes.....	118
8.2.1.3. Erreur en distance absolue pour l'ensemble des groupes.....	119
8.2.1.4. Réponses au questionnaire pour l'ensemble des groupes.....	120
8.2.1.5. Résumé issu de la tâche 1.....	120
8.2.2. Exploration mentale de distances (<i>tâche 3</i>).....	121
8.2.2.1. Chez l'ensemble des participants.....	121
8.2.2.2. Chez les participants voyants privés temporairement de vision.....	122
8.2.2.3. Chez les participants non-voyants tardifs.....	123
8.2.2.4. Chez les participants non-voyants de naissance.....	123
8.2.2.5. Résumé issu de la tâche 3.....	124

8.2.3. Comparaison mentale de distances (<i>tâche 4</i>).....	126
8.2.3.1. Analyse des pourcentages de réponses correctes.....	126
8.2.3.1.1. Chez l'ensemble des participants.....	126
8.2.3.1.1.1. Effet de la modalité d'acquisition.....	126
8.2.3.1.1.2. Effet de la variable groupe	127
8.2.3.1.1.3. Pourcentage de réponses correctes en fonction de la distance.....	128
8.2.3.1.1.4. Interaction des variables groupe et distance.....	129
8.2.3.1.2. Variations des pourcentages de réponses correctes par groupe.....	129
8.2.3.1.2.1. Effet de la modalité d'acquisition	130
8.2.3.1.2.2. Effet des différences de distances.....	130
8.2.3.1.2.3. Interaction des variables modalités et distances.....	131
8.2.3.1.3. Résumé sur les pourcentages de réponses correctes issus de la tâche 4.....	133
8.2.3.2. Analyse des temps de réponse.....	134
8.2.3.2.1. Chez l'ensemble des participants.....	134
8.2.3.2.1.1. Effet de la modalité d'acquisition	134
8.2.3.2.1.2. Effet de la variable groupe.....	135
8.2.3.2.1.3. Effet des différences de distances.....	135
8.2.3.2.1.4. Interaction des variables groupe et distance.....	136
8.2.3.2.2. Variations des temps de réponse par groupe.....	137
8.2.3.2.2.1. Effet de la modalité d'acquisition	137
8.2.3.2.2.2. Effet des différences de distances.....	138
8.2.3.2.2.3. Interaction des variables modalités et distances.....	139
8.2.3.2.3. Résumé sur les temps de réponse issus de la tâche 4.....	141
8.2. Discussion (<i>expérience 3</i>).....	142

CHAPITRE 9 : Analyse comparative des <i>expériences 1, 2 et 3</i>	147
9.1. Exploration mentale de distances.....	147
9.1.1 Analyse globale.....	147
9.1.2. Comparaison par modalités d'apprentissage.....	148
9.1.3. Comparaison par groupes	148
9.1.4. Résumé.....	149
9.2. Comparaison mentale de distances.....	150
9.2.1 Pourcentage de réponses correctes.....	150
9.2.1.1. Analyse globale.....	150
9.2.1.2. Comparaison par modalités d'apprentissage.....	150
9.2.1.3. Comparaison par groupes	150
9.2.1.4. Résumé.....	151
9.2.2. Temps de réponse.....	151
9.2.2.3. Analyse globale.....	151
9.2.2.4. Comparaison par modalités d'apprentissage.....	152
9.2.2.5. Comparaison par groupes	152
9.2.2.6. Résumé	152
CHAPITRE 10 : Discussion générale et perspectives.....	155
Références bibliographiques.....	166

Introduction Générale

Les études de l'invalidation accidentelle des systèmes sensoriels conduisent à démontrer l'un des aspects fondamentaux du fonctionnement de l'humain : sa capacité à s'adapter à son environnement en dépit d'une atteinte de l'intégrité de son système nerveux. Pour cela, il bénéficie de ce que l'on caractérise couramment comme la "plasticité neuronale".

Le concept de plasticité neuronal réfère aux processus neurobiologiques à la base d'adaptations morpho-fonctionnelles du système nerveux, en réponse à des modifications de l'environnement et/ou consécutives aux atteintes de l'intégrité du système. La neuroplasticité persiste à l'âge adulte et confère à l'organisme la possibilité de réaliser des comportements adaptés à la variabilité des facteurs de l'environnement rencontrés lors de son développement.

Dans le cadre des travaux rapportés dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à la « plasticité » comportementale de l'individu dès lors qu'il est privé dès la naissance de l'un de ses sens, en l'occurrence, la vue. Plus spécifiquement, nous avons décidé d'étudier la façon dont cet individu pouvait se représenter mentalement l'espace dans lequel il évolue, et la façon dont il pouvait bénéficier des informations provenant de ses autres sens. Il s'agissait de comprendre si des étapes indispensables dans la construction des représentations mentales opéraient dès le plus jeune âge, et dans quelle mesure la plasticité comportementale / cérébrale pouvait pallier cette privation visuelle précoce ; ou bien si malgré cela, la privation totale d'un sens affecterait de façon définitive, la qualité des représentations mentales. En d'autres termes, si les processus impliqués dans la génération des représentations mentales se mettent en place très tôt lors du développement de l'individu, pouvons-nous déterminer si certaines particularités des représentations mentales seront plus affectées que d'autres ? De plus, est-ce que l'environnement sera plus ou moins bien « internalisé » selon que la personne est dotée ou privée du sens visuel dès les premières étapes de son développement ? Si tel était le cas, cela signifierait qu'il existe des limites aux capacités d'adaptation des autres systèmes sensoriels ; en d'autres termes des limites à la « substitution » d'un ou plusieurs sens, à un sens manquant.

Dans ce contexte, les activités de recherche présentées ici contribuent à déterminer l'importance de l'expérience visuelle précoce sur l'une des particularités des représentations mentales : la préservation, au sein de ces représentations, des relations métriques entre les éléments présents dans les environnements, et à partir desquels sont générées ces représentations.

Au-delà, les expérimentations que nous avons menées nous permettent de contribuer à la réflexion concernant le format des représentations mentales, autrement dit, l'implication du sens visuel dans l'élaboration des qualités structurales des images ou représentations mentales. A ce propos, la question de l'appropriation de l'espace par les individus a déjà été débattue depuis de nombreuses années. Plusieurs hypothèses ont été avancées et divers courants au sein de la communauté des chercheurs en psychologie donnent lieu à d'importantes controverses, présentées dans les premières pages de ce manuscrit. Un des courants théoriques actuel et encore largement considéré comme un courant de référence est celui de la théorie dite "quasi-pictoriale". De manière globale, cette théorie propose l'existence de représentations mentales de nature imagée. Les individus auraient la capacité de générer des images mentales des environnements ou des objets, et pourraient de ce fait, retrouver des informations sur ces derniers, en leur absence. Ainsi, l'imagerie mentale serait conçue comme "l'ensemble des mécanismes par lesquels l'individu construit des représentations internes qui préservent les attributs figuraux des objets, les inscrits en mémoire, puis leur redonne une actualité cognitive dans des circonstances ultérieures" (Denis, 1998). Plusieurs paradigmes expérimentaux ont été mis en œuvre et ont permis de démontrer la pertinence du recours à cette notion d'image mentale dans la résolution de différentes tâches.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons utilisé deux de ces paradigmes expérimentaux, en les adaptant de façon à pouvoir les proposer à des personnes non-voyantes. Nous voulions observer dans quelle mesure une privation visuelle dès la naissance affectait les résultats issus des expérimentations ayant abouti à l'idée de représentations mentales de nature visuelle.

Afin de répondre à ces interrogations, nous avons examiné quatre types de participants, dont trois privés à degrés divers du sens visuel : non-voyants de naissance, non-voyants tardifs, et voyants privés temporairement et artificiellement de vision, en comparaison avec un groupe bénéficiant du sens visuel.

Ainsi, nous avons en premier lieu proposé une tâche d'exploration mentale de distances (*expérience 1*), avec l'apprentissage d'une configuration par description verbale ou exploration tactile. Ces deux conditions d'apprentissage renvoyaient respectivement aux sens auditif et tactile. Cette première expérience nous a permis d'étudier un processus très employé dans le cadre de l'étude de l'imagerie mentale, l'exploration mentale de distances, et qui associe à une distance croissante un temps de réponse proportionnel. Nous avons souhaité soumettre cette tâche à nos participants afin de vérifier si l'exploration mentale de distances

est affectée par la privation visuelle, et si l'une ou l'autre des modalités sensorielles serait de nature à favoriser ce processus. L'intérêt d'une telle expérimentation vise à statuer sur les données très controversées relatives à la contribution du sens visuel dans l'exploration mentale. Il est vraisemblable que ces contradictions reposent sur le faible nombre d'études impliquant des participants non-voyants.

Nous avons ensuite approfondi la question de la préservation, dans les représentations mentales dont elles étaient issues, des relations métriques existant entre les éléments d'une configuration à mémoriser.

Nous avons proposé une seconde expérience de comparaison mentale de distances (*expérience 2*), toujours en comparant les deux modalités d'acquisition de la configuration. Cette tâche était d'autant plus pertinente que la réponse des participants pouvait être objectivement évaluée. En effet, dans cette expérience, les participants devaient décider entre deux distances, laquelle des deux était la plus longue, les réponses étant de ce fait soit justes soit fausses. L'analyse de ces résultats, associée à celle de l'*expérience 1*, d'exploration mentale de distances, nous a permis d'évaluer la préservation de la métrique des représentations mentales de nos participants. Cependant, aucune différence significative n'est apparue entre les deux conditions d'apprentissage dans les deux premières expériences. Par ailleurs, à la fin de chacune des *expériences 1 et 2*, nous avons soumis un questionnaire à nos participants en leur demandant de décrire la façon dont ils parvenaient à résoudre les tâches expérimentales. La plupart des personnes non-voyantes ont évoqué une stratégie de simulation de déplacement moteur (du doigt ou de l'ensemble du corps) pour résoudre ces tâches.

Nous avons alors décidé de proposer une dernière expérimentation (*expérience 3*), dans laquelle les participants seraient immergés dans un environnement de dimensions réelles, bien que la configuration soit générée virtuellement (environnement virtuel audio 3D). Nous avons proposé aux participants plusieurs tâches au sein de cet environnement. Une nouvelle fois, nous les avons sollicités pour réaliser une tâche d'exploration et de comparaison mentale de distances, permettant une analyse comparée de l'ensemble de nos données obtenues au sein des trois expériences. De plus, nous avons utilisé ce dispositif pour enregistrer l'ensemble des mouvements (de la tête et du corps) de nos participants, avec l'avantage précieux de pouvoir prendre en considération les stratégies motrices mises en œuvre par les participants pour effectuer ces différentes tâches. L'environnement était constitué de 6 sources sonores

disposées sur le pourtour d'un cercle virtuel de 1,5 m de diamètre. Après un apprentissage verbal de la configuration de l'environnement grâce à la modalité auditive ou, après une acquisition par exploration active, grâce cette fois au sens kinesthésique, les participants ont réalisé une tâche de reconstruction de la scène initiale. Nous avons, grâce à cela, pu mesurer les erreurs de positionnement des objets sonores composant l'environnement, et cela, en fonction d'une part de la condition d'apprentissage de l'environnement, et d'autre part, du type de privation visuelle des participants. Nous avons ensuite proposé une seconde tâche *in situ* aux participants qui consistait à leur présenter quatre variantes de la scène initiale plus la scène correcte, et à leur demander s'ils détectaient un changement quelconque par rapport à la configuration initiale. Nous avons opéré des changements d'ordre métrique, ainsi que des interversions entre différentes sources sonores. Dans cette dernière expérimentation, nous n'avons pas créé de groupe "voyant gardant les yeux ouverts". En effet, ce groupe n'avait été sollicité dans les premières expérimentations que pour nous donner l'assurance de retrouver des résultats identiques à ceux de la littérature, validant alors sans équivoque nos procédures expérimentales. La partie résultats de l'*expérience 3* inclut les données issues de la première expérimentation (reconstruction de la scène initiale), ainsi que celles obtenues dans la tâche d'exploration mentale de distances et dans la tâche de comparaison mentale de distances. Bien que d'autres expérimentations aient été menées au sein de l'environnement virtuel, nous ne présenterons dans le cadre de cette thèse que les expérimentations décrites ci-dessus permettant d'approfondir spécifiquement la question de la préservation de la métrique au sein des représentations mentales des personnes non-voyantes.

Partie I : Cadre Théorique

Chapitre 1

L'imagerie mentale dans la recherche sur la cognition

L'intérêt des chercheurs pour l'imagerie mentale remonte aux débuts de la psychologie expérimentale, avec notamment W. Wundt, fondateur de la discipline, en 1876. Ce dernier considérait que l'imagerie mentale jouait un rôle cognitif essentiel, alors que 25 ans plus tard (1901), cette notion était totalement remise en question, notamment par O. Külpe et ses étudiants de l'Université de Würzburg. Par des expériences introspectives demandant aux participants de décrire la façon dont ils avaient pu résoudre les tâches expérimentales qui leur étaient proposées, les auteurs montraient que certaines composantes des processus mentaux, notamment de type "association", étaient clairement de nature non imagée (Mayer et Orth, 1901). Ainsi à cette époque, même si l'existence des images dans les activités cognitives était admise, pour certains auteurs, un intérêt se dégagait pour les processus qui permettent la génération de ces images mentales et qui ne sont pas de nature imagée. Cette approche s'appuyant sur la méthodologie introspective déclencha naturellement des controverses, notamment de la part de W. Wundt. L'introspection révéla d'ailleurs très vite ses limites et fut discréditée auprès de la majorité des psychologues expérimentalistes, ce qui eut pour conséquence un rejet fort de la notion d'image mentale auprès de la communauté des chercheurs.

C'est alors qu'est né le courant behavioriste, avec J.B. Watson, qui influença significativement la psychologie, posant la question de la réalité scientifique de la conscience en général, et de l'imagerie en particulier. L'influence du béhaviorisme entraîna l'exclusion des études et des publications sur l'image mentale du domaine de la psychologie expérimentale durant une trentaine d'années. Les auteurs de ces courants, notamment par le biais de Watson, s'insurgeaient contre l'enfermement de la psychologie humaine dans "une série de questions spéculatives (...) impossibles à soumettre à un traitement expérimental" (1913). En 1930, ils considéraient que l'étude de ces représentations mnémoniques d'objets non présents aux sens ne portait réellement que sur des "chimères". Ces critiques ont d'autant plus été considérées qu'elles invoquaient le manque de preuves expérimentales soutenant la thèse d'une signification fonctionnelle de l'imagerie dans les conduites humaines.

Ce n'est que dans les années 1960 et 70, qu'une révolution dans le domaine de la cognition fit son apparition, remplaçant l'étude des représentations mentales au cœur des préoccupations scientifiques. Cette révolution prit son essor avec des études menées en psychologie appliquée, notamment sur les effets de privations sensorielles, ou bien d'études sur les effets des drogues hallucinogènes. Dès 1963, puis en 1966, Piaget et Inhelder, affirmèrent que l'imagerie était le produit d'une activité symbolique et qu'elle était issue d'un processus actif et constructif, récusant par cette affirmation les propos réduisant l'imagerie à un prolongement de la perception ou à une trace résiduelle de la sensation. Cette vision de l'imagerie fut soutenue par de nombreux auteurs comme Neisser, en 1967, qui parla lui aussi de l'imagerie comme du résultat d'une construction active de l'individu, et non comme une "copie dormante d'expériences antérieures". En 1971, Allan Paivio confirmait de manière expérimentale les propriétés mnémoniques de l'imagerie mentale, mettant en avant que la notion d'imagerie devait pleinement réintégrer le champ de la psychologie (Paivio, 1971). C'est surtout vers la fin des années 70 qu'un regain d'intérêt pour l'imagerie mentale s'est manifesté. Plusieurs auteurs se sont intéressés à la question de l'image mentale, en proposant différentes expérimentations, comme celles utilisant la rotation mentale menées par Shepard et ses étudiants (Shepard et Cooper, 1982), ou l'exploration mentale, par S. Kosslyn (1973, 1978), par exemple. C'est ainsi que de nouveaux paradigmes furent mis en place pour tenter d'appréhender ce phénomène qui avait une particularité majeure, celle de ne pouvoir être directement observé.

1.1. Développements théoriques

C'est dans ce contexte qu'un débat sur le format des représentations mentales a vu le jour au sein de la communauté des chercheurs en psychologie. Pour une partie de cette communauté scientifique, les images mentales auraient des propriétés analogues aux environnements ou objets dont elles sont issues. Pour l'autre partie, le recours à l'imagerie consisterait en la manipulation de symboles computationnels au sein d'un système essentiellement apparenté au langage (Fodor, 1975). Les années 70, verront apparaître cette controverse théorique très forte, communément appelée le "débat analogique / propositionnel" (the "analog – propositional debate"), le débat entre analogie et forme propositionnelle de

l'imagerie mentale. Plus tardivement, une autre théorie prendra forme, celle de la perception active. Nous développerons ici les aspects principaux de ces trois théories.

1.1.1. Théorie quasi-pictoriale

Certains auteurs défendent l'idée selon laquelle l'imagerie est une forme de représentation bien particulière, distincte des représentations liées au langage, mais qui prend une forme analogue à l'environnement ou l'objet auquel elle fait référence.

Steven Kosslyn, avec ses travaux des années 1973, puis 1978, est l'un des plus fervents défenseurs de ce courant de pensée. C'est en 1980 que Kosslyn propose sa théorie computationnelle, "quasi-pictoriale" de l'imagerie visuelle, basée sur des analogies avec les ordinateurs graphiques (Kosslyn, 1980). Il fait une comparaison avec les fichiers graphiques qui stockent l'information sous une forme compressée, et non imagée, mais qui, lorsqu'ils sont utilisés, sont traduits sur une carte mathématique (bitmap) sur l'écran d'un ordinateur en attribuant à chaque pixel une couleur spécifique. Comme le suggère Kosslyn, l'information visuelle peut être stockée en mémoire dans le cerveau sous forme de descriptions compactes, mais nous ne faisons l'"expérience" de l'image que lorsque cette information est utilisée pour créer une carte en deux dimensions d'un espace visuel, dans un espace spécifique, une mémoire définie fonctionnellement qu'il appelle le "buffer visuel". Celui-ci serait le support des images mentales, et aurait les mêmes propriétés que celles des espaces pourvus de coordonnées. Ainsi, ce qui pour nous serait l'expérience de l'imagerie mentale correspondrait à la mise en forme de telles cartes dans le buffer visuel.

De ce fait, alors que l'image mentale instanciée dans le buffer visuel aurait la forme d'une "image", l'information correspondante en mémoire à long terme serait stockée sous forme de "propositions" (Kosslyn et Pomerantz, 1977). En ce sens, l'information serait de nature "amodale" et permettrait aux individus de construire à partir d'informations de type "propositions" des représentations de type "images".

D'autres auteurs comme Denis (1979), Kosslyn (1973, 1975) ou Shepard (1975), se sont attachés à mettre en évidence les propriétés intrinsèques des images mentales, leurs qualités fonctionnelles, à distinguer les images mentales comme "événements transitoires avec des propriétés structurales" (Denis, 1994). Cornoldi et ses collaborateurs ont, en 1989, distingués deux types d'images mentales, soit générales et de basse résolution (générées assez rapidement, mais moins vivaces, et moins mémorisables que les images mentales riches en

détails), soit de haute résolution (Cornoldi, De Beni & Pra Baldi, 1989(a?), De Beni & Pazzaglia, 1995). Denis (1991), grâce à une tâche d'exploration mentale de distances, montra que la représentation mentale contient davantage d'information que le texte à partir duquel cette dernière a été construite, c'est-à-dire non seulement les détails de la configuration, mais aussi les distances relatives entre ces derniers. Plusieurs séries d'expérimentations, notamment de rotation mentale (Shepard et Metzler, 1971), d'exploration mentale de distances (Kosslyn, Ball et Reiser, 1978, Denis et Cocude, 1989) et de comparaison mentale de distances (Denis et Zimmer, 1992) ont ainsi été développées et ont permis d'arriver à la conclusion du caractère analogique des représentations imagées. Nous reviendrons sur les détails de ces expérimentations dans la section suivante.

1.1.2. Approche fonctionnaliste ou propositionnaliste

Zenon Pylyshyn (1980, 1981, 2001) en revanche, postule l'existence d'une forme unique de représentation, qui n'est l'équivalent ni de représentations imagées, ni de représentations verbales, qu'il qualifie de "propositions" et qui permettraient aux individus de construire des relations spatiales entre les objets, quel que soit le type d'énoncé (verbal ou bien visuel). Ainsi, pour lui et les partisans de ce courant, la réalité représentationnelle sous-jacente à l'imagerie (ainsi qu'aux expériences perceptives) ne serait pas une "image", mais une description mentale détaillée. La cognition fonctionnerait en s'appuyant sur des éléments sémantiques de base, les propositions, et qui auraient comme éléments constitutifs un prédicat et des arguments. Ce qui serait stocké en mémoire à long terme ne serait donc pas une image, mais une description des objets sous forme de propositions. En ceci, Pylyshyn rejoint Kosslyn (Kosslyn et Pomerantz; 1977), en revanche, il ajoute que les relations existant entre les objets sont elles aussi stockées sous cette forme dans cette mémoire. Cette représentation permettrait ainsi l'accès à une information de nature conceptuelle, conservée sous une forme abstraite et qui ne préserverait qu'une partie négligeable de l'information spécifiquement figurative ou linguistique des messages d'entrée (Guenther, 1980).

Pour Pylyshyn, les données expérimentales ayant permis d'étayer la théorie pictoriale de l'imagerie mentale sont compatibles avec d'autres interprétations. Ainsi, la plupart des phénomènes observés seraient simplement engendrés par la nature même des tâches proposées aux participants, qui sont invités à simuler ce qui d'après eux arriverait s'ils étaient en train d'observer visuellement une scène (Pylyshyn, 2002). Les individus appliqueraient

donc leur connaissance a priori des événements pour donner leur réponse. Ainsi, c'est parce qu'un individu aurait connaissance de la trajectoire que doit suivre un objet s'il est lancé avec une force déterminée dans une orientation précise, qu'il pourrait simuler la vitesse de son déplacement. Pour Pylyshyn, on ne peut confondre cette connaissance a priori avec l'architecture même des représentations cognitives. C'est la question de la pénétrabilité cognitive. Cet argument a cependant été mis en cause par des recherches effectuées dès 1985 (Denis et Carfantan, 1985) sur les tâches d'exploration mentale de distances, et qui montrent que dans leur grande majorité, les participants sont incapables de prédire les régularités chronométriques de l'exploration mentale. Dans cette étude, les auteurs se sont intéressés aux connaissances non scientifiques sur les images mentales de 148 étudiants, en leur demandant, après leur avoir brièvement décrit une expérience classique d'exploration mentale, de deviner quels sont les résultats typiques qui peuvent être obtenus. Seuls 9,5 % des participants supposent que les temps d'exploration augmentent avec l'accroissement des distances à explorer. Et 31,8 % des participants n'ont pas d'idée sur la relation qui unit les temps d'exploration aux distances. Enfin, la majorité des participants, 58,8 %, ne s'attendent pas à observer une proportionnalité entre les temps et les distances à parcourir.

Pour Pylyshyn (2002), la tentative d'attribution d'un quelconque format ou de mécanismes spécifiques sous-tendant l'imagerie mentale n'a finalement que peu d'intérêt. Pour lui, les représentations et les processus sous-tendant l'imagerie ne sont pas différents de ceux impliqués dans d'autres formes de raisonnement. Cette idée se retrouve dans la conception de Chatterjee et ses collaborateurs (1999), qui postulent l'existence d'événements mentaux qui peuvent être représentés aussi bien sous un format spatial que sous un format verbal.

1.1.3. Une approche de la perception active

Dans cette théorie, la place centrale est donnée à l'action, et nul n'est besoin de recourir au concept d'une image mentale interne. En effet, l'espace serait construit sur la base des conséquences sensorielles des actions de l'individu, par association entre informations extéroceptives et proprioceptives, et également les informations de copies efférentes renseignant directement le système central sur les commandes motrices effectuées (Lenay, 2002). Cette conception trouve son origine dans les réflexions de Henri Poincaré (Poincaré, 1905, 1907) concernant son modèle de la reconstruction interne de l'espace. Pour Poincaré, localiser un objet consiste essentiellement à avoir une représentation des déplacements

nécessaires pour l'atteindre. "Quand on dit [...] que nous 'localisons' tel objet en tel point de l'espace, qu'est-ce que cela veut dire? Cela signifie simplement que nous nous représentons les mouvements qu'il faut faire pour atteindre cet objet; ..." (Poincaré, 1907). Nous pourrions donc imaginer que nul n'est besoin de recourir à une représentation interne de type image mentale pour penser la notion d'espace. Par association entre les sensations extéroceptives (stimulations sensorielles) et les sensations proprioceptives des mouvements effectués, nous pourrions imaginer que l'individu puisse finalement construire un espace comme l'ensemble continu de toutes les lois de contingences sensorimotrices liant commandes d'actions et sensations reçues. En 1977, Gibson écrit "on doit percevoir pour se déplacer, se déplacer pour percevoir". La "perception" et l'"action" sont, dès cette époque, considérées comme deux volets indissociables de la même réalité. Cette idée trouvera un écho avec Arbib (1980), qui parlera alors de cycle "action - perception". Ainsi, selon le point de vue de l'approche écologique, c'est la covariation apprise des informations d'origine interne et des informations visuelles qui permettrait d'accéder au mieux à la structure spatiale. En effet, c'est grâce aux "invariants" (ou "variables d'ordre supérieure", Gibson, 1979), qui s'appuient sur le flux visuel, que l'observateur peut identifier sa position dans le monde extérieur : tout mouvement de l'individu engendre une modification de l'ensemble du dispositif optique (ou "optic array"), et donc la possibilité d'extraire les invariants permettant de comprendre la structuration de l'espace.

Ce ne serait donc pas grâce à des images mentales, sous-tendues par l'activation d'aires cérébrales définies que les individus évolueraient dans l'espace. Il n'y aurait nul besoin de recourir à une quelconque représentation. Ce qui donnerait la qualité de l'expérience perceptive, c'est la relation qu'entretiennent les individus avec le monde, indépendamment des processus neuronaux ou des aires cérébrales activées.

O'Regan et Noë (2001) se basent sur les phénomènes de substitution sensorielle pour étayer cette proposition. Il serait en effet possible d'obtenir des sensations qualitativement similaires aux sensations visuelles via d'autres canaux sensoriels, au travers de règles de co-variations entre mouvements du corps et inputs sensoriels similaires à celles de la modalité visuelle. La première étude de cet ordre a été menée par Paul Bach-y-Rita et ses collaborateurs en 1967, et a permis de montrer qu'un système de substitution sensorielle reliant une caméra vidéo à des vibreurs tactiles recevaient une information de nature à provoquer chez une personne non-voyante une sensation similaire à la vision.

Du point de vue d'O'Regan (1992), le monde extérieur est une forme de mémoire externe continuellement présente qui peut être consultée à tout moment par les mouvements de l'œil,

ce qui permet d'éliminer le recours à un stockage en mémoire centrale, en particulier du fait qu'il n'est plus alors nécessaire de représenter l'image dans un site bien particulier du cerveau. Il conclut que "bien des problèmes de la perception s'évanouissent une fois qu'on admet que le cerveau n'a pas besoin de former de représentation interne, de réplique ou d'icône du monde extérieur".

Ces notions renvoient au fait qu'une action ne peut être contrôlée que grâce aux feed-back sensoriels renvoyés aussi bien par le système proprioceptif que par le système visuel. Il n'y aurait donc pas de percept ou bien d'image mentale, mais seulement l'activité de percevoir ou d'imaginer, qui prendrait différentes formes selon ce qui est perçu ou bien imaginé (Norman, 2002).

Ainsi, dans le cadre de cette théorie alternative, les représentations mentales ne seraient pas un raisonnement appliqué sur des données disponibles en interne, sous forme visuelle, haptique, etc. Le phénomène des images mentales, dont l'existence ne peut être niée, ne serait en fait que le résultat de l'association entre des actions et les perceptions conservées en mémoire par l'individu. Ainsi, faire l'expérience d'une image mentale, pour retrouver une information, consisterait à ce que nous pouvons, en faisant un effort "mental", retrouver cette particule d'information dans notre esprit (O'Regan et Noë, 2001).

1.2. Recherches expérimentales sur l'imagerie mentale

Dans les expérimentations de cette thèse, nous nous sommes inspirés des travaux effectués par différents auteurs s'intéressant à l'imagerie mentale, telle qu'elle est défendue par la théorie pictoriale ou quasi-pictoriale. De nombreux chercheurs, au cours de ces dernières décennies, ont tenté de montrer que la propriété principale de l'image mentale était son isomorphisme structural à l'égard des objets ou des environnements dont elle assurait l'évocation lorsque ces objets étaient absents du champ perceptif de l'individu (Paivio, 1986; Richardson, 1999).

Il est aujourd'hui bien établi que les individus sont capables de reconstituer mentalement un objet ou un environnement à partir de stimuli perceptifs ou même de descriptions verbales. De la même manière, ils sont aussi capables d'effectuer des opérations cognitives efficaces sur ces représentations internes (Bloom et al., 1996; Denis, 1996). Dans cette section, nous développerons tout d'abord quelques-unes des expérimentations qui ont

permis de mettre en évidence les caractéristiques analogiques des images mentales, puis nous aborderons des études de neuroimagerie portant sur l'imagerie mentale.

1.2.1. Données comportementales

Une des premières expérimentations menées dans l'étude des images mentales a été celle de Shepard et Metzler (1971) sur la tâche de rotation mentale (voir aussi Shepard & Cooper, 1982). Dans leur expérimentation, les auteurs présentaient aux participants des dessins en perspective d'une paire d'objet tri-dimensionnels constitués de petits cubes. Les objets d'une paire avaient soit la même forme, soit étaient l'image en miroir l'un de l'autre; et par ailleurs, leur orientation pouvait différer soit dans le plan du dessin, soit en profondeur. Les participants avaient pour tâche de vérifier si les objets avaient ou non la même forme. L'hypothèse des auteurs était que dans une situation où les deux objets n'ont pas la même orientation, les participants devraient mentalement imaginer la rotation de l'un des deux pour l'aligner avec l'autre, et pouvoir ainsi comparer leurs formes. Ils postulaient que le temps nécessaire pour donner leur réponse serait d'autant plus long que la distance angulaire entre les deux objets de la paire serait grande. Les résultats ont montré que le temps nécessaire pour juger si les deux objets avaient la même forme était proportionnel à la différence angulaire entre les deux objets, que la rotation se fasse dans le plan du dessin ou en profondeur. Ces données ont permis de montrer que les rotations mentales s'effectuaient à vitesse constante, mais au-delà, que les participants manipulaient des objets tri-dimensionnels, et non des projections bi-dimensionnelles de ces objets. La rotation mentale d'objets trouve donc une correspondance avec la rotation réelle d'objets concrets.

C'est ensuite en 1973, puis en 1978 que Steven Kosslyn et ses collaborateurs ont proposé une autre tâche expérimentale, considérée comme fondatrice dans le domaine d'étude de l'imagerie mentale et de ses propriétés. Il s'agissait d'une tâche *d'exploration mentale* ou *"scanning mental"*. Cette tâche consistait pour les participants à apprendre la configuration d'une île, après avoir pris connaissance de cette configuration par perception visuelle. Il devait mémoriser sept détails qui figuraient sur cette île (une hutte, un puits, une plage, etc). Il devait ensuite se représenter mentalement l'île et effectuer, à la demande de l'expérimentateur, des déplacements mentaux entre les détails pris deux à deux. Par exemple, l'expérimentateur demandait au participant de se placer mentalement au niveau d'un premier élément situé sur l'île (palmier) et de se déplacer mentalement jusqu'à un second élément (hutte). Le participant

devait imaginer un point noir se déplaçant à vitesse constante, en suivant un tracé direct, du premier élément jusqu'au second. Au terme du trajet, il devait appuyer sur un bouton pour indiquer qu'il avait achevé le déplacement correspondant. L'analyse des résultats a montré que le temps de déplacement mental le long de la droite reliant les deux détails (temps d'exploration mentale) était d'autant plus élevé que la distance à parcourir était plus grande. Ces données ont été interprétées comme étant la preuve que les images mentales étaient des entités "quasi-pictoriales" sur lesquelles les participants pouvaient effectuer des activités cognitives, et en aucun cas, qu'elles ne pouvaient être réduites à un épiphénomène.

Pour de nombreux auteurs, ces données attestaient l'isomorphisme structural entre les images mentales, issues de la perception visuelle d'une configuration, et la configuration en question (Denis, 1991; Finke, 1989; Kosslyn, 1994). Selon cette interprétation, les images mentales intègrent les propriétés métriques de l'objet ou de l'environnement à partir desquelles elles ont été construites.

Cependant, certains auteurs (Pylyshyn 1973, 1981 ; Intons-Peterson & Roskos-Ewoldsen, 1989) ont critiqué l'interprétation proposée par Kosslyn sur les résultats obtenus dans la tâche de scanning mental. Pour Zenon Pylyshyn, par exemple, les résultats de l'expérience ne reflétaient que la connaissance tacite des participants sur la manière dont les distances sont censées être parcourues, et que plus une distance est grande et plus le temps nécessaire à son parcours est long. Pour répondre à cette critique, plusieurs auteurs se sont attachés à démontrer que la relation temps / distance n'était ni le reflet de la tâche demandée au participant, ni celui d'une connaissance tacite de ce que les résultats devraient être (Denis & Carfantan, 1985 ; Jolicoeur & Kosslyn, 1985 ; Pinker, Choate & Finke, 1984).

Notamment, et afin de démontrer que le temps d'inspection mental reflétait bien les caractéristiques spatiales inhérentes à l'image mentale, une étude fut menée par Finke et Pinker (1982). Dans cette expérimentation, les auteurs montraient aux participants une configuration aléatoire de quatre points pendant cinq secondes. Après un très bref intervalle (1 seconde), une flèche apparaissait sur un fond blanc, pointant dans une direction. Les participants devaient alors décider si la flèche pointait ou non en direction d'un des points de la configuration qui venait d'être vue. Dans cette tâche, aucune demande explicite n'était faite au participant sur la nécessité de se créer une image mentale de la scène, néanmoins, les résultats montrent que le temps de réponse est proportionnel à la distance entre la flèche et le point. Par ailleurs, la plupart des participants rapportent s'être référés à une image mentale de la configuration pour pouvoir exécuter la tâche. En outre, un des éléments importants de cette expérimentation est le temps de présentation de la configuration qui était beaucoup trop court

(5 sec) pour permettre aux participants de faire des calculs de distance entre la flèche et les différents points, d'autant plus qu'ils ne savaient pas à l'avance où serait située cette flèche. Il ne leur était donc pas possible dans ce cas précis de faire appel à une connaissance tacite pour résoudre la tâche expérimentale. Ces données ont donc suggéré que l'inspection des images mentales était la stratégie utilisée dans le cas des estimations de direction entre différents éléments dont les positions relatives n'avaient pas explicitement été encodées. La robustesse de ces résultats a été confirmée dans plusieurs autres études dans l'extension du paradigme d'exploration mentale de distances (pour une revue, voir Denis & Kosslyn, 1999).

Les travaux de Kosslyn sur l'exploration mentale, ont amené plusieurs interrogations. En effet, dans le cas de l'étude proposée en 1978, les participants devaient créer une représentation mentale de la configuration après l'avoir observée visuellement, et ensuite résoudre la tâche en question.

Les données obtenues dans la tâche d'exploration mentale de distances étaient donc le reflet de la mémorisation visuelle de l'environnement. L'interprétation des auteurs concernant le caractère imagé des représentations pouvait alors uniquement être lié à la modalité sous laquelle l'information avait été mémorisée par les participants. D'autres auteurs ont alors cherché à savoir dans quelle mesure les résultats obtenus par Kosslyn pouvaient être retrouvés si l'apprentissage de la configuration ne se faisait plus par cette modalité. Si un environnement venait à être appréhendé par des participants via un autre canal sensoriel, qu'en serait-il de l'analogie, de l'isomorphisme des représentations mentales?

Des expériences comparant les réponses de participants amenés à construire l'image mentale d'une configuration spatiale, soit à partir de données verbales, soit à partir de la perception visuelle préalable d'une carte de cette configuration, ont fait apparaître la similitude des relations métriques au sein des représentations mentales générées dans les deux conditions (Denis & Cocude, 1989, 1992, 1997). Pour permettre cette comparaison entre les deux modalités d'apprentissage, les auteurs ont adapté le matériel expérimental. Il s'agissait de pouvoir décrire l'environnement de la façon la plus précise possible, sans que les participants éprouvent de difficulté à localiser mentalement l'emplacement des détails. Les auteurs ont donc adapté le matériel expérimental initial de l'île de S. Kosslyn sous la forme d'une île de forme circulaire, sur la périphérie de laquelle différents détails géographiques étaient positionnés. La position de ces différents éléments était donnée au participant en se référant au cadran horaire, par exemple le port était localisé à "1 heure" sur la périphérie de l'île. Après avoir soumis les participants à la tâche d'exploration mentale de distances, les auteurs ont retrouvé la relation linéaire entre le temps nécessaire pour parcourir mentalement une distance

et la longueur de cette distance, que l'apprentissage se fasse par une description verbale ou bien par l'observation préalable d'une carte représentant l'environnement à mémoriser. Ces régularités chronométriques ont une nouvelle fois été interprétées comme le reflet indirect mais fiable de la structure des images mentales, et reflétant les similarités structurales entre la représentation mentale créée par les participants, et la configuration initiale, décrite ou perçue. L'étude de Denis, Gonçalves et Memmi (1995) a permis de montrer que cette similarité structurale ne s'établissait pas dès le début de la tâche, mais qu'elle s'installait progressivement au cours de l'apprentissage. Ainsi, l'image construite à partir de la première écoute d'une description verbale ne possède pas de structure reflétant l'objet décrit. C'est seulement au terme d'une série d'écoutes successives que l'image se consolide dans une structure reflétant de façon réaliste celle de l'objet décrit.

En 1992, Denis et Zimmer ont repris le matériel proposé dans la tâche d'exploration mentale de distances, l'île de forme circulaire (Denis et Cocude, 1989), et ont proposé une tâche de *comparaison mentale de distances*. Dans cette expérimentation, le participant, comme dans la tâche décrite précédemment, apprenait la configuration de l'île et la position des différents détails géographiques qui la composaient. Après avoir appris la configuration, il était ensuite demandé au participant de comparer mentalement les distances entre des paires de détails (par exemple, est-ce que la distance entre le port et la crique est plus grande que la distance entre le port et le phare ?). Le participant donnait sa réponse sur deux touches de clavier, permettant à l'expérimentateur de relever ses réponses ainsi que les temps de réponse associés.

Cette expérimentation était particulièrement intéressante puisqu'elle permettait de recueillir une réponse de type juste ou faux, rendant les données obtenues objectivement mesurables. Les résultats issus de cette tâche de comparaison mentale de distances ont mis en évidence que les individus traitent les grandes différences de distances plus rapidement que les petites, et qu'ils font moins d'erreur de jugement dans le cas des grandes différences de distances que dans le cas des petites (Denis, 1996; Denis & Zimmer, 1992). Ce phénomène est aussi établi en psychophysique. Il a été confirmé également au niveau des représentations mentales, à travers le phénomène dit de "comparaison" ou "distance symbolique", selon lequel des jugements de différence (par exemple, la différence de taille) entre des objets évoqués de mémoire requièrent d'autant moins de temps que l'ampleur de la différence jugée est plus importante (cf. Moyer, 1973; Paivio, 1975). Les auteurs ont ensuite proposé cette même tâche aux participants, mais cette fois après un apprentissage de la configuration par description verbale, et ils ont pu mettre en évidence le même type de résultats. Ainsi, que la configuration

spatiale ait été décrite verbalement, ou bien observée sur une carte, plus la différence entre deux distances est importante, moins le temps de réponse est long, et plus le pourcentage de réponses correctes est élevé.

Ces deux méthodes expérimentales, exploration mentale de distances et comparaison mentale de distances, ont permis de mettre en évidence des propriétés importantes des représentations mentales de l'espace utilisant l'imagerie mentale. Les régularités chronométriques qui se manifestent dans ces tâches font apparaître que les images mentales gardent une trace de la métrique de l'arrangement spatial des objets évoqués (Denis, 1996; Denis & Kosslyn, 1999), qu'elles aient été construites à partir d'informations visuelles ou après description verbale. Par ailleurs, après l'apprentissage d'un environnement par exploration locomotrice, les résultats obtenus par Iachini et Giusberti (2004) indiquent clairement que la relation linéaire caractéristique entre les temps d'exploration mentale et la distance parcourue est là aussi maintenue. Dans leur étude, les participants devaient apprendre la configuration d'un environnement en se déplaçant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre entre six cercles de couleurs dessinés sur le sol. Les six cercles, disposés de façon à délimiter un périmètre clos, permettaient de déterminer la taille de l'environnement (petit, moyen ou grand) en fonction de la distance entre deux cercles (0,5 m, 1 m ou 2 m). Le participant devait tout d'abord effectuer quatre tours complets de l'environnement (sans contrainte temporelle), pour être ensuite replacé à son point de départ et se faire bander les yeux par l'expérimentateur. La tâche des participants consistait ensuite à se déplacer mentalement de leur position initiale jusqu'à un autre cercle énoncé par l'expérimentateur, dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et tout en respectant le périmètre clos. Les temps de réponse des participants (entre l'énoncé du cercle à atteindre mentalement et le moment où le participant dit l'avoir atteint) augmentent linéairement avec les distances, quelle que soit la taille de l'environnement, suggérant que les distances relatives entre les différents objets de l'environnement sont conservés.

Une seconde expérimentation menée par ces auteurs sur le même matériel expérimental compare les performances de participants apprenant l'environnement soit uniquement en le regardant et sans se déplacer (condition visuelle), soit en se déplaçant mais sans le regarder (condition kinesthésique). Les résultats montrent tout d'abord une relation linéaire entre les temps de réponse et les distances à parcourir mentalement, mais aussi un effet de la taille de l'environnement sur les pentes des droites de régression. Ainsi, plus l'environnement est grand, et plus la vitesse d'exploration mentale est faible, suggérant que les distances absolues au sein de l'environnement sont intégrées dans l'image mentale. Par

ailleurs, un effet de la modalité d'apprentissage indique que dans la condition visuelle, le processus d'exploration mentale est plus rapide que dans la condition kinesthésique. Ces données suggèrent donc que les images mentales générées à partir d'une activité locomotrice possèdent les mêmes propriétés que celles issues d'une expérience perceptive.

Enfin, le paradigme développé par Denis et Cocude (1989), et adapté en 2004 par Chabanne, Péruch, Denis et Thinus-Blanc, a permis d'étudier l'effet de la modalité d'apprentissage (visuelle ou verbale) et de la perspective de présentation (survol ou trajet) d'un environnement spatial sur les propriétés des représentations mentales de cet environnement. Dans cette étude, quatre conditions d'apprentissage ont été proposées. Pour la condition "survol-visuel", la carte d'un jardin circulaire a été créée, contenant sur sa périphérie six points de repère, dont les distances entre chacun d'entre eux diffèrent. Pour la condition "trajet-visuel", les participants regardent la vidéo du trajet le long d'un chemin entourant le jardin. Pour la condition "survol-verbal", la position des points de repères est donnée verbalement grâce à leur position horaire (Denis & Cocude, 1989). Pour la dernière condition, "trajet-verbal", le texte soumis aux participants correspond à une description du parcours représenté dans la vidéo. Les participants ont pour tâche d'explorer mentalement la distance séparant deux détails figurant dans l'environnement préalablement appris. Les résultats montrent que quelle que soit la condition expérimentale à laquelle ont été soumis les participants, les temps de réponse augmentent linéairement en fonction de la distance à parcourir mentalement. Ces données suggèrent donc que quelle que soit la modalité ou la perspective de présentation de l'environnement, aucune incidence de ces facteurs sur les qualités métriques de la représentation mentale générée ne peut être mesurée. Ainsi, l'effet de la distance sur les tâches impliquant une exploration mentale de distances se produit sur les images mentales issues aussi bien de la perception visuelle (Kosslyn, 1973, Kosslyn et al., 1978) que d'une exploration tactile (Kerr, 1983; Röder & Rösler, 1998) d'une description verbale (Denis & Cocude, 1989 ; 1992 ; 1997) et que d'une exploration locomotrice (Iachini & Giusberti, 2004). Il en résulte que la distance peut être pensée comme une caractéristique non spécifique à la modalité d'acquisition de l'environnement, et qu'elle serait le résultat de l'intégration du recouvrement des informations provenant des différents systèmes sensoriels (Millar, 1994 ; Röder & Rösler, 1998).

L'ensemble de ces données est interprétable comme venant à l'appui du caractère analogique des représentations mentales. Plus récemment, ces études ont trouvé des prolongements grâce aux données provenant des études menées dans les sciences du cerveau, notamment les données neuroanatomiques. La plupart d'entre elles ont permis de conforter de

manière forte le recouvrement des structures cérébrales impliquées d'une part dans des activités perceptives et d'autre part dans des tâches d'imagerie mentale, suggérant que l'image mentale relèverait bien d'une activité similaire à celle de la perception, et de ce fait que la représentation interne générée par les individus serait de nature analogique. En revanche, toutes les études menées grâce à ces techniques ne parviennent pas aux mêmes conclusions.

1.2.2. Données en neuroimagerie

Grâce aux techniques de neuroimagerie, les études comportementales ont trouvé des prolongements de grande valeur dans les approches neurobiologiques, qui en étendent singulièrement la portée. Les études qui utilisent les techniques d'imagerie cérébrale fonctionnelle attestent pour la plupart le recouvrement des structures cérébrales activées pendant la perception et pendant l'imagerie dans différentes modalités sensorielles (dont la modalité visuelle). Rappelons brièvement quelques informations générales sur ces différentes méthodes. Lorsqu'un individu effectue une activité sensorimotrice ou cognitive, les mécanismes cérébraux sous-tendant ces activités suscitent de manière continue des besoins métaboliques importants. Cette demande énergétique est comblée principalement par l'utilisation de glucose. Comme le cerveau ne dispose que de peu de réserves, il est donc dépendant de l'apport continu dans les régions cérébrales sollicitées de glucose et d'oxygène. Dès lors, les variations régionales des taux de glucose ou d'oxygène correspondent assez précisément aux besoins métaboliques requis. Ainsi, les mesures du débit sanguin régional ou de la consommation cérébrale d'oxygène et de glucose permettent d'obtenir une estimation de l'activité métabolique liée à l'activité synaptique sous-tendant des tâches sensorimotrices, ou cognitives. La tomographie par émissions de positrons (TEP) et l'imagerie cérébrale fonctionnelle par résonance magnétique (IRMf) sont les deux principales méthodes utilisées dans la recherche pour mesurer l'activité métabolique liée à la résolution d'une tâche effectuée par un individu. En ce qui concerne la TEP, elle bénéficie d'une bonne résolution spatiale, mais d'une faible résolution temporelle. Par ailleurs, elle nécessite aussi l'injection d'un marqueur radioactif. L'IRMf présente l'avantage d'être une technique non invasive, tout en offrant une meilleure résolution temporelle que la TEP, en revanche, cette méthode est extrêmement bruyante.

Le Bihan et ses collaborateurs (1993), grâce à l'IRMf, ont fourni des arguments en faveur du rôle du cortex visuel primaire dans la génération d'images mentales de patterns de

diodes qu'ils viennent d'observer. De la même manière, à l'aide de la TEP et de l'IRM fonctionnelle, Kosslyn (Kosslyn et al., 1993, 1995, 1999) a montré l'implication du cortex visuel primaire dans l'exécution de tâches d'imagerie mentale, aussi bien après un apprentissage par description verbale que par perception visuelle. Ces résultats suggèrent que l'imagerie et la perception font appel à des mécanismes cérébraux communs. Pour Damasio par exemple (Damasio et al., 1991) toutes les aires impliquées dans la perception de différents patterns devraient être activées quand ces différents patterns sont imaginés par un individu. Cependant, l'activation observée est plus importante lors des tâches d'imagerie mentale que dans le cas de la perception, indiquant que la génération de l'image mentale visuelle est une tâche cognitive plus coûteuse que la simple perception.

Pour Kosslyn, l'activation de l'aire V1 lors de tâches d'imagerie mentale conforte l'hypothèse selon laquelle les aires visuelles sous-tendent l'imagerie visuelle à l'identique de la perception visuelle (Kosslyn et al., 1993, 1997, 1995). D'autres auteurs sont parvenus aux mêmes conclusions, en mettant en évidence une implication des aires visuelles primaires durant des tâches d'imagerie mentale (Klein, Paradis, Poline, Kosslyn & Le Bihan, 2000 ; Lambert, Sampaio, Schreiber & Mauss, 2002). Cependant, les données obtenues par Le Bihan et ses collaborateurs (1993) montrent que tous les participants soumis aux tâches d'imagerie mentale ne développent pas une activation spécifique du cortex visuel primaire, tout comme c'est le cas dans les travaux d'Ogawa (Ogawa et al., 1993). Par la suite, il a été envisagé que les aires visuelles primaires puissent n'être activées, en imagerie mentale, que lorsque les images sont formées avec un degré de résolution élevé (Sakai et al., 1994; Kosslyn et al., 1997; Thompson & Kosslyn, 1998). Ce résultat n'a cependant pas été répliqué par d'autres études (Mellet et al., 2000).

En 1995, Mellet, Tzourio, Denis et Mazoyer, dans une étude menée en TEP comparent l'activation cérébrale obtenue dans une tâche d'exploration mentale de distances, dans des conditions perceptives ou bien en imagerie mentale. Les auteurs observent que les deux tâches font appel à un réseau commun de structures cérébrales, incluant les régions occipitales externes supérieures bilatérales et une région pariétale interne gauche (precuneus). Ils mettent en évidence que la région occipitale est impliquée dans la génération et la maintenance des images visuelles, alors que la région pariétale semble être impliquée dans leur exploration.

D'autres études, en revanche, en TEP (Mellet et al., 1995) et en IRMf (D'Esposito, Detre, Aguirre, Stallcup, Alsop, Tippet & Farah., 1997 ; Knauff, Kassubek, Mulack & Greenlee, 2000), ne sont pas parvenues à obtenir les mêmes implications du cortex visuel primaire, dans des tâches d'imagerie mentale faisant suite à un apprentissage par perception

ou bien par description verbale. Seule l'implication des aires occipitales externes supérieures bilatérales et pariétale interne gauche a pu être mise en évidence (Mellet et al., 1995). L'imagerie mentale visuelle serait une fonction du cortex visuel associatif, et la génération des images mentales serait localisée asymétriquement dans l'hémisphère gauche (D'Esposito et al., 1997). Ainsi, les aires du cortex visuel primaire seraient activées dans les conditions perceptives, alors qu'elles apparaissent inactives lorsque le participant traite des images issues de descriptions verbales. Ces données soutiennent l'hypothèse selon laquelle *l'imagerie mentale visuelle dépendrait principalement des cortex visuels associatifs, et non pas du cortex visuel primaire.*

En 1999, Cocude, Mellet et Denis ont proposé une revue récapitulant de nombreuses données disponibles en neuroimagerie sur les processus impliqués dans l'imagerie mentale visuelle. Il apparaît une implication du cortex pariéto-occipital dans le traitement des images mentales, qu'elles soient issues d'une expérience perceptive ou bien construite à partir d'entrées linguistiques. Ces données sont compatibles avec l'idée selon laquelle la représentation visuelle construite à partir d'une expérience visuelle et celle construite à partir d'une description impliquent les mêmes aires corticales. En revanche, aucune démonstration n'a pu être apportée de l'implication du cortex visuel primaire dans la génération des images mentales. Les auteurs ont cependant décelé chez les participants les plus imageants une activation spécifique du cortex sensorimoteur gauche dans le cas des tâches verbales, et une activation du cortex temporo-occipital gauche dans les tâches nécessitant d'imaginer et d'explorer mentalement une configuration (sans activation du cortex visuel primaire). Ces données sont en accord avec celles présentées par Roland et Gulyas (1995), dont les travaux ne montrent pas d'implication des aires visuelles primaires dans des tâches d'imagerie mentale visuelle, mais une activation neuronale du cortex temporo-occipital et du cortex pariéto-occipital dans le cas où les individus se représentent mentalement des objets ou des scènes sous forme d'images.

En 1996, Mellet et ses collaborateurs proposent une autre étude où les participants doivent construire des images mentales de cubes en trois dimensions à partir d'instructions verbales. Cette tâche implique une très forte composante spatiale, c'est-à-dire l'objet en lui-même, ainsi que son extension en trois dimensions. Lors de la résolution de la tâche en imagerie mentale, les auteurs ont mis en évidence l'activation d'un réseau bilatéral occipito-pariéto-frontal (incluant le cortex occipital supérieur, le cortex pariétal inférieur, et le cortex pré-moteur), ainsi qu'une activation du cortex temporal inférieur droit. En revanche, les auteurs n'observent pas d'activation des aires visuelles primaires et parviennent à la

conclusion que les tâches d'imagerie mentale n'impliquent pas de manière systématique une activation des aires visuelles primaires. Le débat sur l'implication des aires visuelles primaires dans les tâches d'imagerie mentale reste donc totalement d'actualité. Plusieurs voies restent à explorer pour comprendre cette divergence de résultats. Une première piste concerne le seuil de significativité considéré par les chercheurs pour décider qu'une activation cérébrale peut être attribuée spécifiquement à la résolution de la tâche effectuée par les participants, et non au "bruit" dû au fonctionnement "normal", du cerveau. A l'heure actuelle, il n'existe pas de consensus quant à la méthodologie d'analyse (quel test statistique, quel seuil de significativité...) pour les images IRMf, notamment (Le Bihan, 1995). Ceci pourrait être à l'origine, pour une part tout au moins, de ces données contradictoires. Une autre hypothèse concernerait le type d'image mentale que les individus doivent générer avec l'idée que les images mentales visuelles de haute résolution activeraient les aires visuelles primaires. Cette hypothèse a été testée en 2000 par Mellet et al., en mesurant l'activation des aires visuelles primaires par l'augmentation du flux sanguin régional dans les différentes localisations cérébrales durant une tâche où les images mentales devaient être générées à haute résolution. Les résultats ne montrent pas de différence d'activation des aires visuelles primaires entre la condition d'imagerie mentale et la condition sans imagerie. Il semble donc que cette hypothèse ne soit pas valide.

Un point important sur cette question a été soulevé par Kaski (2002) qui souligne que même si une relation existe entre la visualisation d'images mentales et le cortex visuel primaire, ces résultats n'impliquent pas nécessairement que le cortex visuel primaire soit le site de stockage des images visuelles, mais apportent des arguments forts en faveur de l'implication du cortex strié dans l'activité d'imagerie visuelle.

Une autre façon d'aborder cette question est de s'intéresser aux images mentales générées par des personnes n'ayant pas le bénéfice de l'expérience visuelle. Tel est l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 2

Influence d'une privation sensorielle sur les processus d'imagerie mentale

Il existe plusieurs indications du statut privilégié de l'expérience visuelle chez l'humain par rapport aux autres modalités sensorielles, voire de son influence sur le codage et le traitement de l'information spatiale. En effet, il est bien établi que dans une tâche de localisation, la vision peut biaiser l'information auditive et proprioceptive (Pick, Warren & Hay, 1969). A partir de ces données, une hypothèse plausible est que les personnes voyantes organisent les informations auditives et proprioceptives selon une carte visuelle, qui représenterait un moyen de stockage économique, condensant différentes informations dans un même cadre. Ainsi, si la vision est requise dans la construction de représentations spatiales, il devrait s'en suivre que les personnes dépourvues d'expérience visuelle sont moins performantes que les personnes voyantes dans des tâches évaluant la cognition visuo-spatiale. Cependant, plusieurs études menées chez les personnes non-voyantes mettent en évidence une multitude de résultats suggérant une limite aux interprétations trop hâtives du caractère imagé des représentations mentales. C'est pourquoi il nous est apparu important de nous intéresser de plus près aux représentations mentales des personnes non-voyantes, en prenant soin de distinguer les personnes non-voyantes de naissance des personnes non-voyantes tardives.

2.1. La privation visuelle

2.1.1. Les personnes privées de vision

La privation visuelle, comme toute privation sensorielle, est définie par la réduction du nombre total de stimuli exploités par les capteurs sensoriels. La définition de la qualité fonctionnelle de la vision est généralement réalisée sur la base des seuils de perception concernant l'acuité visuelle et l'étendue du champ visuel. Ni la définition scolaire de la cécité (acuité visuelle inférieure à 2/10), ni sa définition légale (acuité visuelle inférieure à 1/20) ne

sont adoptées par les chercheurs travaillant sur le domaine de la cognition spatiale des personnes non-voyantes. Pour ces derniers, ne sont considérées comme non-voyantes, que les personnes ayant une acuité visuelle et un champ visuel nul, ne disposant au maximum que d'une perception lumineuse diffuse très faible. La personne non-voyante peut dans ce cas détecter et utiliser une source lumineuse (par exemple, le soleil), mais sera incapable de distinguer une masse sombre sur un fond éclairé ou bien de reconnaître une forme (Gaunet, 1996).

Certains auteurs considèrent qu'une personne peut être dite non-voyante précoce si la cécité est parvenue dans la troisième ou quatrième année de l'enfance (Rieser et al., 1992 ; Fletcher, 1981). En revanche, d'autres auteurs parlent de cécité précoce, mais nous dirons plutôt de naissance, lorsque la cécité a été reconnue au plus tard à la fin de la première année de la vie de l'enfant (Hatwell, 1985; Rieser et al., 1986; Byrne et Salter, 1983; Heller et Kennedy, 1990).

Dans les travaux rapportés dans cette thèse, nous avons choisi de travailler avec des personnes non-voyantes de naissance, dont la cécité avait été reconnue au plus tard à la fin de la première année de l'enfance, ainsi qu'avec des personnes non-voyantes tardives, qui ont perdu la vue après l'âge de trois ans au minimum.

2.1.2. La notion de période critique

Le concept de "période critique" renvoie à la notion de la plasticité neuronale. Il se réfère aux processus neurobiologiques à la base des adaptations morphologiques et fonctionnelles du système nerveux en réponse aux modifications de l'environnement et/ou consécutives aux atteintes de son intégrité (Compan et Afonso, sous presse). Il s'agit d'une période sensible durant laquelle les fonctions comportementales se mettent en place. De ce fait, dans le cas de la privation visuelle, cette période peut perturber la mise en place des systèmes optimaux de traitement des informations spatiales, comme celles des coordinations sensori-motrices dans les dix premiers mois de la vie du jeune enfant. C'est dans cette période en effet que l'enfant met en oeuvre des actions qui lui permette de se diriger aussi bien vers des stimuli sonores que visuels, et ainsi mettre en place les premiers schémas de coordination sensorimotrice, et plus particulièrement, visuo-motrices (Portalier et Vital-Durand, 1989). C'est ensuite à partir de dix mois que la locomotion se met en place. Cette étape est cruciale, puisque selon certains auteurs (Rieser et al., 1992, Gibson, 1979), c'est grâce au flux visuel

consécutif au déplacement de l'individu, ici le jeune enfant, que se mettraient en place les systèmes de traitement des informations de l'espace, en permettant d'extraire les invariants spatiaux. Un auteur, Warren (1974), s'est plus particulièrement intéressé aux périodes durant lesquelles l'expérience visuelle précoce aurait un rôle. La première période concerne la mise en place de la coordination main-œil, et se situe entre 70 et 150 jours. C'est à ce moment que le bébé commence à contrôler visuellement les mouvements de ses mains, ce qui lui permet de créer une base stable grâce à laquelle il pourra utiliser efficacement l'information motrice. La seconde période concerne la mise en place des déplacements autonomes (d'abord avec les quatre membres, puis la station debout et la marche). Il s'agit ici pour l'enfant de mettre en relation son activité locomotrice avec ses conséquences perceptives, visuelles. Enfin, la troisième et dernière période sensible correspondrait à la mise en place du langage, qui faciliterait la mise en œuvre de stratégies basées sur le langage pour participer à la mise en place de systèmes de traitement des informations spatiales.

Une période sensible plus longue encore correspond à la période de maturation du système visuel qui permet au jeune enfant d'atteindre l'acuité visuelle proche de l'adulte entre 6 mois et un an (Harter, Deaton & Odom, 1977). Ainsi, la "période sensible" durant laquelle la plasticité cérébrale permet certaines modulations de la mise en place d'un comportement, laisse place à une période dite "critique", de sorte qu'une privation sensorielle intervenant dans cette période sensible aura des effets irréversibles.

Ainsi, nous avons choisi de considérer, tout comme dans la plupart des études menées sur la cognition spatiale, que la cécité serait de "naissance", dès lors qu'elle serait apparue dans la première année de vie de l'individu. C'est en effet dans cette période que l'apprentissage du couplage vision-action se met en place. Certains auteurs étendent cette période à 2 ans $\frac{1}{2}$ - 3 ans, considérant que l'apprentissage de ce couplage ne se fixerait au niveau du système nerveux qu'au-delà de cette période, et que la privation visuelle dans ce cas, ne tirerait aucun avantage de cette expérience visuelle préalable (Gaunet, 1996). Au regard de cette distinction, nous avons préféré néanmoins nous placer dans les conditions les plus rigoureuses de privation de la vue pour nos participants non-voyants de naissance. En revanche, la communauté scientifique s'accorde à considérer les individus comme non-voyants tardifs dès lors que la cécité survient après l'âge de trois ans, âge auquel l'effet de l'expérience visuelle précoce est bien stabilisé au niveau du système nerveux.

2.2. Conséquences de la privation visuelle précoce

Nous allons dans cette section nous intéresser aux conséquences que la privation d'expérience visuelle peut avoir à différents niveaux chez l'individu atteint de cécité, et tenter d'appréhender les caractéristiques des systèmes sensoriels dont cet individu dispose, ainsi que leur réorganisation face à cette privation sensorielle. Par ailleurs, nous tenterons d'apporter un éclairage sur les conséquences développementales de la cécité, aussi bien sur un plan psychologique que cognitif. (Voir la thèse de F. Gaunet).

2.2.1. Développement des autres modalités sensorielles

Il a été montré que l'importance du système de localisation spatiale par la modalité proprioceptive décroît fortement avec l'âge chez la personne voyante (Renshaw, 1930, cité par Warren & Pick, 1970), alors qu'elle ne diminue pas chez la personne non-voyante (Renshaw, Wherry & Newlin, 1930, cité par Warren & Pick, 1970). Par ailleurs, en ce qui concerne le système auditif, des différences d'asymétries auditives ont été mises en évidence entre les non-voyants et les voyants privés temporairement de vision (Larsen & Håkonsen, 1983). Il semble donc que la cécité permette des réorganisations sensorielles palliant les conséquences cérébrales de la privation visuelle définitive. C'est ce que l'on appelle le phénomène de compensation sensorielle. C'est ainsi que des aptitudes spécifiques se trouvent mises en avant chez la personne non-voyante, comme le fait d'être capable de distinguer de manière plus efficace une voix parmi d'autres (Bull, Rathborn & Clifford, 1983). D'autres auteurs (Ashmead, Wall, Ebinger, Eaton, Snook-Hill et Yang, 1998) ont montré que la calibration au cours du développement de l'écoute spatiale chez l'homme n'était pas dépendante de l'expérience visuelle des individus. En effet, les estimations psychophysiques de résolution spatiale sur le plan horizontal et vertical et les évaluations de distances à atteindre ou à parcourir (en pas marchés) jusqu'à la localisation de sources sonores sont similaires pour les personnes voyantes et non-voyantes.

En revanche, les personnes non-voyantes développent la capacité de détecter un obstacle à distance et sans vision, c'est le phénomène d'écholocation. En effet, ces personnes deviennent très sensibles à l'écho des pas, au renvoi des courants d'air ou modifications de températures. Il est établi que les personnes non-voyantes sont capables de détecter une boîte

de quelques dizaines de centimètres de haut et de large posée en travers d'un chemin à parcourir. En revanche, d'autres auteurs ne sont pas parvenus à mettre en évidence d'hypersensitivité des sens chez les personnes non-voyantes (Hollins, 1989) ou plus spécifiquement une meilleure discrimination des seuils fréquentiels relatif à la fréquence ou sensibilité concernant les intensités sonores supraliminaires. Par ailleurs, alors que nous pourrions supposer que les non-voyants de naissance sont avantagés dans le traitement des informations spatiales auditives, Wanet et Veraart (1985) ainsi que Veraart et Wanet Defalque (1987), ont montré que les non-voyants de naissance se distinguent des non-voyants tardifs et voyants privés temporairement et artificiellement de vision par une moindre précision dans des tâches de localisation d'une source sonore dans l'espace de préhension. Pour ce qui est du sens du toucher, Hatwell (1978) a montré que la cécité précoce, tardive ou temporaire n'influe pas sur la reconnaissance des formes simples, ni sur la discrimination des formes non familières chez les enfants (Foulke et Warm, 1967). Il n'apparaît donc pas de supériorité systématique des performances d'une population par rapport à une autre (Miller, 1992). Les compensations observées seraient en définitive le résultat d'une attention accrue de la part de la personne non voyante (Cronin et al., 1983 ; Bross & Borenstein, 1982 ; Hollins, 1989).

2.2.2. Développement psychologique

Le développement psychologique des personnes souffrant de cécité est souvent affecté en comparaison de celui de personne dont les capacités sensorielles sont intègres. Les personnes non-voyantes de naissance développent plus facilement des comportements autistiques (comportements stéréotypés, balancements, mutisme) ou des écholalies que les personnes voyantes (Janson, 1993), jusqu'à hauteur de 25 à 50% chez les enfants non-voyants (Sampaio, 1989). Fraiberg (rapporté par Sampaio, 1994) a mis en évidence un retard du développement de la notion de mère en tant qu'"objet" chez les bébés non-voyants qui n'apparaît qu'entre dix et seize mois sans que la mère soit tactilement en contact avec son enfant, et donc uniquement par l'intermédiaire de la voix. Ce retard induit directement une difficulté du jeune enfant non-voyant à développer les notions de moi / non-moi et de permanence de l'objet, vers lequel peuvent être dirigées des actions de préhension. A cela s'ajoute une autre difficulté rencontrée par ces enfants, qui est directement liée à l'attitude de leurs propres parents. En effet, face à la naissance d'un enfant ne bénéficiant pas de la vue, il

est fréquent d'observer chez les parents, une attitude soit de surprotection, soit quasiment d'abandon de l'enfant, se traduisant par une hypo-stimulation (Hollins, 1989). Les conséquences peuvent être graves puisqu'elles entravent les possibilités pour l'enfant de découvrir et d'explorer le monde par lui-même. Par ailleurs, de par son manque d'interactions sociales par le faciès, les expressions faciales pauvres, les sourires spontanés restreints, et même l'absence du geste de tendre les bras pour être pris dans les bras de ses parents durant sa première année de vie, les échanges sociaux et affectifs du jeune enfant non-voyant avec les autres enfants ou adultes sont très restreints. Ceci pourrait être à l'origine des troubles développementaux des non-voyants, aussi bien autistiques que dépressifs.

2.2.3. Développement cognitif

En ce qui concerne le développement du langage, alors que les enfants voyants prononcent leurs deux premiers mots entre 10 et 23 mois (14 mois en moyenne, Bayley, 1969), les enfants non-voyants de naissance les prononcent à 18 mois (Fraiberg, 1977). Une autre difficulté apparaît également dans l'utilisation stable du "je" (Sampaio, 1991). Elle proviendrait directement des conséquences de la cécité du jeune enfant. Cette dernière serait un obstacle au développement de l'image de soi, et à la construction cohérente de la signification du "moi" (Fraiberg, 1977). Par ailleurs, Landau et Gleitman (1985) ont montré que les jeunes enfants non-voyants, bien que capables de répondre à des demandes orales, de répéter des mots et d'exprimer leurs souhaits à des âges similaires aux jeunes enfants voyants, n'intègrent que tardivement certains mots comme les adverbes, les prépositions ou les verbes auxiliaires, qui permette de passer d'une expression télégraphique à un style plus discursif. Ceci va à l'encontre des observations d'Yvette Hatwell (1966), qui ne parvient à mettre en évidence aucune différence majeure dans le développement du langage entre les enfants voyants et non-voyants. Elle montre en effet des différences entre les enfants non-voyants de naissance et les enfants voyants, mais principalement sur les tests évaluant l'intelligence non-verbale, plutôt que sur les épreuves de logique à base verbale. Par ailleurs, pour ce qui est de l'évaluation de leur quotient intellectuel, les non-voyants de naissance atteignent le même niveau que les voyants ; notons néanmoins qu'ils ne sont évalués que sur la partie verbale de tests de QI développé pour les personnes voyantes. Ainsi, aucune validation expérimentale ne permet de systématiser le fait que les personnes dépourvues d'expérience visuelle précoce soient affectées au niveau de leur quotient intellectuel. Certains auteurs rappellent néanmoins

que la composition d'un groupe de personnes non-voyantes de naissance homogène lors de passations de tests entraîne l'élimination d'un certain nombre de personnes, notamment celles qui ne parviennent pas à comprendre les consignes expérimentales (Rieser et al., 1986 ; Loomis et al. 1992).

Les capacités d'apprentissage et de mémorisation des personnes non-voyantes ont surtout été étudiées par les chercheurs par le biais de l'imagerie mentale. Ainsi, dans les tâches où le participant doit mémoriser des paires de mots associés, Paivio et Okavita (1971) ont montré que lorsque les mots permettant d'associer la modalité visuelle et la modalité auditive, les performances des deux groupes sont similaires (par exemple, ville / sifflement). En revanche, si les deux mots font référence uniquement à une évocation visuelle, les performances des non-voyants se trouvent affectées.

La mémoire de travail des personnes non-voyantes peut également être testée grâce à des tâches faisant appel à l'imagerie mentale. Cornoldi, Cortesi et Pretti (1991) ont demandé à des personnes voyantes et non-voyantes de suivre mentalement des chemins à travers des matrices bi et tri-dimensionnelles de complexité différente. Ils ont montré que les non-voyants de naissance étaient moins performants que les voyants, et ceci d'autant plus que le trajet mental à effectuer était complexe. Ces auteurs soutiennent l'hypothèse selon laquelle l'expérience visuelle précoce permet d'associer aux représentations mentales des informations spécifiques (issues de la vision). Le codage de l'information se ferait donc sous une forme analogique, permettant de traiter simultanément un plus grand nombre d'items.

D'autres études ont permis de mettre en avant la plus grande efficacité de l'imagerie auditive chez les non-voyants de naissance que chez les voyants privés de vision (Ernest, 1987), et leur meilleure performance dans des tâches d'appariement mental de stimuli tactiles (Davidson, Barnes et Mullen, 1974).

Pour certains auteurs, le retard d'établissement des compétences non spatiales seraient responsable du retard lié à l'établissement des compétences spatiales, 14 ans pour les voyants et 17 ans pour les non-voyants de naissance (Ochaïta et Huertas, 1993). Les retards de développements observés chez le jeune enfant non-voyant de naissance, particulièrement au niveau des fonctions sensori-motrices et du langage, pourraient, au moins en partie, expliquer les déficits spatiaux observés chez les jeunes de moins de 17 ans (Herrmann, Chatman et Roth, 1983). Dans leur revue de la littérature, Gaunet et Thinus-Blanc (1996) présentent deux conclusions. La première est que, à partir du moment où un individu a bénéficié d'une expérience visuelle précoce, il traite les informations spatiales non-visuelles avec une précision similaire à un individu voyant. En revanche, cette précision peut varier chez les

personnes dépourvues d'expérience visuelle précoce. La deuxième conclusion est que les déficits des personnes non-voyantes de naissance sont moins accentués dans le cas d'une reproduction de relations spatiales préalablement expérimentées, que dans le cas où la tâche nécessite une manipulation mentale de l'information acquise (voir aussi Rieser, Lockman et Pick, 1980).

2.3. Recherches expérimentales sur l'imagerie mentale des personnes non-voyantes

2.3.1. Données comportementales

Dans la littérature scientifique, une préoccupation se développe très largement aujourd'hui, à savoir la distinction des composantes visuelles et des composantes spatiales des représentations mentales. En effet, un grand nombre d'études suggère que la vision ne serait pas un pré-requis pour acquérir des concepts spatiaux. Néanmoins, l'expérience visuelle précoce aurait un effet facilitateur sur la génération et l'utilisation des images mentales, même si les personnes non-voyantes de naissance éprouvent davantage de difficultés quand il s'agit d'imaginer des objets en mouvement (Arditi et al., 1988). De nombreuses études ont montré que les non-voyants de naissance construisent et traitent des images visuo-spatiales en utilisant plusieurs types d'informations comme celles de nature proprioceptive, vestibulaire et verbale (Kaski, 2002 ; Thinus-Blanc et Gaunet, 1997; Vecchi, et al., 2001). Les non-voyants peuvent par exemple avoir recours à des images tactiles, en imaginant le mouvement de leur doigt le long d'une scène visuelle, pour retirer de l'information sur les objets ou l'environnement extérieur (Kaski, 2002). Röder et Rösler en 1998 ont ainsi proposé à des personnes non-voyantes de naissance et des personnes voyantes privées de vision, une tâche d'exploration mentale de distance, après avoir pris connaissance de la configuration spatiale à mémoriser par une appréhension tactile. Les auteurs ont mis en évidence que, dans le cas d'une acquisition de la configuration par cette modalité sensorielle, les données chronométriques ne différaient pas entre les différents groupes de participants.

Néanmoins, d'autres travaux montrent que les capacités à générer des représentations mentales sont limitées chez les personnes non-voyantes de naissance. Ainsi, ces dernières éprouvent de plus grandes difficultés à manipuler des stimuli en trois dimensions que les

personnes voyantes avec bandeau sur le yeux et font davantage d'erreurs de reproduction mentale de trajet lorsqu'elles ont pour tâche d'imaginer une trajectoire dans des matrices en trois dimensions (Cornoldi et al., 1991; Cornoldi & Vecchi, 2000). De plus, les non-voyants de naissance produisent un plus grand nombre d'erreurs de pointage vers des cibles mémorisées que les non-voyants tardifs et les voyants privés de vision, ces deux derniers groupes présentant des performances similaires (Thinus-Blanc & Gaunet, 1997). Une autre étude s'est intéressée à la notion selon laquelle la taille angulaire apparente d'un objet diminue avec la distance d'observation. Les auteurs ont montré que chez les voyants privés temporairement de vision cette notion était acquise, alors qu'elle n'est pas obtenue chez les personnes non-voyantes de naissance (Arditi et al., 1988).

L'étude des espaces de préhension et de locomotion a permis d'examiner l'apprentissage d'une configuration spatiale d'objets par des personnes non-voyantes et voyantes privées de vision et d'apporter des arguments en faveur de la limitation des représentations spatiales chez les personnes non-voyantes de naissance (Gaunet & Thinus-Blanc, 1996; Gaunet et al., 1997). Dans ce cadre expérimental, un changement était apporté à la configuration initiale mémorisée et le participant devait détecter et identifier quel était ce changement. Les résultats montrent que les changements d'ordre topologique (échange de positions entre deux objets) sont aussi bien détectés par les trois populations (voyants privés de vision, non-voyants de naissance et tardifs), alors que les modifications d'ordre métrique (déplacement d'un objet en termes de centimètres) sont significativement moins bien détectées chez les aveugles de naissance. La métrique serait donc altérée chez les personnes privées d'expérience visuelle précoce quand elles doivent exécuter une tâche de détection de modification de positionnement d'objet.

Cependant, une autre étude rapportée par Kerr en 1983 montre, dans une tâche d'exploration mentale de distances, qu'il existe une relation forte entre le temps d'exploration mentale des distances et la distance mentale à parcourir, aussi bien pour les personnes voyantes que pour les personnes non-voyantes, qu'elles soient non-voyantes de naissance ou bien non-voyantes tardives. Néanmoins, les temps de réponse des personnes non-voyantes sont significativement plus longs que ceux des personnes voyantes.

Ainsi, grâce à cette tâche d'exploration mentale de distances, Kerr (1983) montre que les informations spatiales d'ordre métrique sont bien conservées chez la personne non-voyante. Les personnes non-voyantes seraient donc capables de créer et de manipuler des représentations spatiales tout comme celles mises en œuvre par les personnes voyantes, à la seule différence que l'expérience visuelle permettrait une génération et un traitement plus

rapide de l'image. Ce résultat confirme ceux issus des travaux menés quelques années auparavant par Marmor et Zaback (1976). Ces auteurs ont mis en évidence que les personnes voyantes privées temporairement de vision effectuaient des rotations mentales à la vitesse de 233° par seconde, alors que les personnes non-voyantes tardives effectuaient ces mêmes tâches à la vitesse de 114° par seconde et les non-voyants de naissance à la vitesse de 59° par seconde pour appairer des stimuli identiques présentés selon des orientations différentes. De plus, ces auteurs ont montré que les personnes non-voyantes de naissance avaient un taux d'erreur d'appariement des stimuli significativement plus important que les personnes voyantes. D'autres auteurs ont repris ultérieurement ce paradigme expérimental et, bien qu'ils aient obtenu les mêmes résultats concernant la vitesse de rotation mentale, ils n'ont trouvé aucune différence dans les taux d'erreurs des groupes expérimentaux (Carpenter & Eisenberg, 1978). En 1997, Thinus-Blanc et Gaunet concluent que la grande variabilité des performances obtenues dans la littérature est tributaire de la nature des tâches expérimentales que les participants doivent résoudre. Vecchi, Tinti et Cornoldi (2004) ont testé l'hypothèse selon laquelle les difficultés rencontrées par les personnes non-voyantes dans le traitement de l'espace, seraient dues au fait de devoir traiter simultanément des représentations spatiales indépendantes. Ils ont présenté des matrices aux participants, qui devaient retenir la position des cibles, et ont ensuite fait varier la façon de redonner l'information. Les résultats ont montré que l'absence de vision n'affectait pas la capacité de traiter et de transformer des images mentales. En revanche, les auteurs sont parvenus à la conclusion que l'absence d'expérience visuelle précoce affectait la capacité de maintenir simultanément différentes informations spatiales, alors que les processus cognitifs qui impliquent une manipulation séquentielle de l'information ne l'étaient pas.

2.3.2. Données en neuroimagerie

Nous ne disposons à l'heure actuelle que de très peu de données concernant les structures cérébrales impliquées dans les tâches d'imagerie mentale chez les personnes non-voyantes. En revanche, de nombreuses études ont été conduites sur l'animal. En résumé, elles indiquent que l'énucléation visuelle précoce induit des modifications structurales des cortex visuels primaire et associatif (Hubel et Wiesel, 1963 ; Wiesel et Hubel, 1965, Berman, 1991). Toutefois, les données de la littérature chez l'homme suggèrent une implication, durant les tâches d'imagerie mentales des aires occipito-temporales et visuelles associatives,

particulièrement du gyrus fusiforme, chez les personnes non-voyantes de naissance (De Volder et al., 2001). D'autres auteurs (Buchel et al., 1998) ont mis en évidence, au delà des activations des aires visuelles extrastriées et des aires pariétales associatives chez les non-voyants congénitaux pendant la lecture du Braille, une activation du cortex visuel primaire chez les non-voyants tardifs (étude menée avec la TEP).

Plus récemment, Vanlierde et ses collaborateurs (Vanlierde et al., 2003) ont mis en évidence avec la TEP, chez des personnes non-voyantes de naissance, une activation de la voie occipito-pariétale, dans la résolution d'une tâche d'imagerie visuo-spatiale. Il s'agissait pour les participants de générer une représentation mentale de patterns bidimensionnels décrits verbalement, placés sur une grille, et d'accéder mentalement à leur symétrie selon différents axes. Ces résultats sont d'autant plus intéressants que cette voie occipito-pariétale activée ici dans l'exécution de tâches d'imagerie mentale par des non-voyants de naissance est celle qui est généralement activée chez les personnes voyantes pendant ces mêmes tâches ainsi que lors de la perception visuelle.

De Volder (1995) et De Volder et al. (1997) se sont intéressés aux effets de la cécité tardive et précoce sur l'organisation corticale des aires visuelles primaires et secondaires. A cet effet, ils ont proposé à des personnes non voyantes de naissance et tardives (cécité survenue à l'âge adulte à la suite de lésions des voies visuelles périphériques), ainsi qu'à des personnes voyantes, des tâches où les participants devaient explorer des objets avec la main droite, ou bien reconnaître des patterns tridimensionnels à l'aide de l'Optacon (dispositif permettant de transformer des stimulations lumineuses en stimulations tactiles). Ils ont comparé les activations cérébrales de ces trois populations au repos ou lors de l'exécution des tâches expérimentales. Alors que l'activité métabolique des autres aires cérébrales est similaire dans les trois populations, le métabolisme des aires visuelles primaires et secondaires des non-voyants tardifs est inférieur à celui des voyants gardant les yeux fermés. En revanche, l'activité corticale dans les aires visuelles est plus élevée chez les non-voyants de naissance que chez les voyants (et donc que chez les non-voyants tardifs). Cet hypermétabolisme bilatéral des aires visuelles est observé chez les non-voyants de naissance aussi bien lorsqu'ils sont au repos que lorsqu'ils résolvent les différentes tâches tactiles ou les tâches de localisation auditive (Wanet-Defalque et al., 1988). Ces données suggèrent que les lésions précoces des voies visuelles périphériques entraînent des modifications de l'organisation anatomo-fonctionnelle du cerveau humain. De Volder et ses collaborateurs (1997) interprètent cet hypermétabolisme en se référant à la notion de "révision synaptique", proposée par Changeux (1983 ; Changeux et Dehaene, 1989), et Edelman (1987, 1992), qui

correspond à une diminution du nombre de synapses redondantes après une hyperproduction initiale de connexions nerveuses. Cette révision synaptique, dénommée "stabilisation sélective" par Changeux et Danchin (1976), ou "validation fonctionnelle" par Jacobson (1978), permettrait donc de maintenir les connexions nerveuses activées par les stimuli extérieurs et éliminerait les connexions surnuméraires moins activées, pour aboutir à l'organisation corticale de l'adulte. Ce processus serait la base même de la plasticité cérébrale. Ainsi, l'hypermétabolisme des aires visuelles des personnes non-voyantes de naissance pourrait provenir d'une absence de "révision synaptique", qui engendrerait la persistance d'une concentration locale inhabituellement élevée de connexions synaptiques (Veraart, De Volder, Wanet-Defalque, Bol, Michel & Goffinet, 1990).

Une autre interprétation de cet hypermétabolisme, conférant aux aires visuelles une fonction non-visuelle pour certaines populations, a été proposée par Sadato et al. (1996). Ces auteurs ont cherché à savoir si des tâches non-visuelles comme des tâches haptiques pouvaient directement activer les aires visuelles primaires. Ils ont alors comparé l'activité corticale des aires visuelles d'individus voyants et non-voyants de naissance sachant bien lire le Braille, grâce à une étude menée en TEP. Les participants ont ainsi été soumis à des tâches de discrimination haptique de propriétés spatiales (angles, largeur), et de mots / non-mots en Braille (pour les non-voyants), ou bien des stimulations passives (mouvements circulaires passifs de l'index sur une surface homogène de points en relief. Les résultats montrent une activation bilatérale des aires visuelles primaires et secondaires chez les non-voyants de naissance durant toutes les tâches de discrimination haptique, avec un niveau d'activation plus élevé dans la tâche de discrimination mots / non-mots en Braille que dans les autres tâches. En revanche, chez les personnes voyantes (privées temporairement de vision) réalisant ces mêmes tâches, les aires visuelles ne semblent pas activées, et vont jusqu'à diminuer durant les tâches de discrimination haptique de propriétés spatiales. Enfin, pour ce qui est de la tâche de stimulation passive, les aires visuelles ne sont pas activées de manière significative, ni chez les voyants, ni chez les non-voyants.

Toujours pour chercher à comprendre le rôle des aires visuelles primaires durant les tâches de discrimination haptique, Cohen et ses collaborateurs (1997) ont utilisé la "stimulation magnétique transcraniale" qui provoque une désactivation fonctionnelle temporaire des aires cérébrales, ici visuelles, par voie magnétique. Ils ont ainsi pu rendre inutilisables les aires visuelles primaires et secondaires de personnes non-voyantes de naissance lisant très bien le Braille, ainsi que de personnes voyantes, dans des tâches de discrimination haptique visant d'une part à identifier des lettres en Braille ou d'autre part des

lettres en relief. Cette "désactivation ponctuelle" des aires visuelles entraîne une chute des performances des non-voyants de naissance aux deux tâches, alors qu'elle n'a aucune conséquence sur celles des voyants. Ces données confirment donc bien que seules les personnes non-voyantes de naissance ont recours aux aires visuelles durant les tâches de discrimination haptique, et donc que le cortex visuel peut avoir une fonction non visuelle sous certaines conditions.

Dans le même sens, Weeks et ses collaborateurs (2000) ont montré une forte activation des aires pariétales postérieures aussi bien chez les non-voyants de naissance que chez les voyants, dans la résolution d'une tâche de localisation auditive (proposée avec la TEP). En outre, ils ont pu mettre en évidence une activation spécifique chez le non-voyant de naissance des aires associatives dans le cortex occipital de l'hémisphère droit. Ceci suggère une plasticité modale du visuel vers l'auditif dans des tâches de localisation auditive, activant les aires occipitales associatives qui à l'origine devraient être impliquées dans les processus visuels (Aziz-Sultan et al., 1997; De Volder et al., 1999 ; Weeks et al., 2000 ; Arno et al., 2001).

L'étude menée par Röder et al. (1999) sur une tâche de discrimination auditive montre que pour l'espace auditif périphérique, les personnes non-voyantes de naissance discriminent de manière plus exacte la localisation des sons que ne le font les personnes voyantes. En revanche, lorsqu'il s'agit de l'espace auditif central, aucune différence significative n'est observée entre ces deux groupes. Ces données ont pu être corrélées à des fréquences de décharge de potentiels évoqués. Les auteurs ont observé une fréquence de décharge plus large et à un niveau du scalp postérieur chez les personnes non-voyantes par rapport à celle observée chez les personnes voyantes. Ces données sont en accord avec celles obtenues dans une étude antérieure (Kujala, Alho, Paavilainen, Summala et Näätänen, 1992), qui suggère que les non-voyants utilisent, dans une plus grande mesure que les voyants, le cortex pariétal, et peut-être même le cortex occipital des aires cérébrales, dans des tâches de localisation de sources sonores.

Chapitre 3

Résumé de la problématique et contribution expérimentale

Adaptation pour des non-voyants de paradigmes expérimentaux testant l'imagerie mentale

En résumé, les études menées pour étudier au plus près les caractéristiques de l'imagerie mentale ont conclu au caractère analogique des images mentales, avec la propriété spécifique que chaque partie de la représentation correspond à la même partie de l'objet décrit ou perçu. En cela, les distances entre les différents objets sont respectées et cela confère à la représentation un isomorphisme structural. Ces données sont basées principalement sur les études menées grâce au paradigme d'exploration de distances qui a permis de mettre en évidence que plus une distance était grande, et plus le temps d'exploration associé était long, mais au-delà, que cette augmentation de temps était linéaire.

La question que nous posons concerne l'importance de l'expérience visuelle précoce sur la capacité des individus à se représenter mentalement un objet, une configuration ou un environnement. Nous nous sommes en effet demandé dans quelle mesure la privation du sens visuel dès les premières étapes de la vie de l'individu allait modifier sa façon d'"internaliser" les éléments qui composent son environnement.

Au regard de la littérature, nous nous sommes plus particulièrement intéressé à la question de l'isomorphisme structural des représentations mentales, et à la conservation de leurs propriétés métriques en comparaison des configurations ou environnements dont elles étaient issues. Les données que nous avons recueillies dans la littérature montrent une multitude de données dont les résultats ne parviennent pas à converger. Pour ce qui est de la question de la préservation des relations métriques entre les différents éléments composant la représentation mentale en comparaison à la configuration initiale, seules deux études d'exploration mentale de distances (à notre connaissance) ont été soumises à des individus non-voyants (Kerr, 1983; Röder et Rösler, 1998).

En outre, ces études montrent des résultats divergents, qui peuvent s'expliquer par la tâche en elle-même, la modalité d'apprentissage de la configuration, ou tout simplement par la composition de la population des personnes non-voyantes (cf supra).

Ainsi, dans le cadre de mon travail de recherche, il m'est apparu indispensable d'approfondir cette question en soumettant des personnes non-voyantes de naissance et non-voyantes tardives à une tâche d'exploration mentale de distance (*expérience 1*), adaptée de l'étude initiale de Denis et Cocude (1992). Par ailleurs, nous avons pris soin de soumettre ces tâches expérimentales en faisant varier la modalité d'apprentissage afin de vérifier l'influence de celle-ci sur les résultats. Grâce à cela, nous souhaitons voir si l'une ou l'autre de ces modalités suppléaient plus efficacement à la privation visuelle. Afin de pouvoir comparer ces données à celles de la littérature, nous avons soumis notre protocole expérimental à des personnes voyantes privées temporairement de vision et voyantes gardant les yeux ouverts durant les phases expérimentales. Nous avons ainsi la possibilité de nous intéresser au rôle de la privation visuelle, qu'elle soit de naissance ou tardive, temporaire ou définitive, ainsi qu'à l'influence de la modalité d'apprentissage.

Dans un second temps, toujours dans le souci de répondre le plus précisément à cette question de la préservation de la métrique au sein des représentations mentales des personnes non-voyantes, nous avons adapté le paradigme de comparaison mentale de distances (*expérience 2*), initialement proposé par Denis et Zimmer (1992) afin de pouvoir le soumettre à des individus non-voyants. Nous avons choisi ce second paradigme parce qu'il n'avait, à notre connaissance, jamais été soumis à des personnes non-voyantes. Ensuite, ce paradigme permettait en plus de la valeur chronométrique associée aux réponses des individus, de pouvoir objectivement mesurer les erreurs de positionnement des différents éléments sur la configuration mémorisée. Les données que nous avons recueillies à partir de ces expérimentations sont très riches, puisqu'elles nous informent d'une part sur la préservation de la topologie de la configuration mémorisée, et d'autre part, sur la précision de localisation mentale des différents éléments. En effet, les réponses des participants dans cette tâche sont objectivement évaluables, dans la mesure où elles sont justes ou fausses. Ces données sont de nature à approfondir la question de la préservation de l'isomorphisme structural au sein des représentations des non-voyants, notamment comme pour *l'expérience 1*, en comparant le rôle de la privation visuelle, de naissance ou tardive, temporaire ou définitive, et l'influence de la modalité d'apprentissage.

Enfin, les résultats issus de nos expériences doivent contribuer à la réflexion théorique sur le format des représentations mentales, autrement dit, sur l'implication du sens visuel dans l'élaboration des qualités structurales des images ou représentations mentales.

Partie II : Chapitres Expérimentaux

Chapitre 4

Introduction à la partie expérimentale et problématique

Pour tenir compte des effets de la variabilité interindividuelle, un soin particulier a été consacré à la sélection des critères requis pour constituer des populations homogènes. Les groupes expérimentaux ont été composés de six femmes et six hommes, afin de contrôler l'effet du genre. De plus, nous avons systématiquement associé au profil d'une personne non-voyante de naissance (nvn), celui d'une personne non-voyante tardive (nvt), ou voyante privée artificiellement de vision à l'aide d'un bandeau (vpv). Pour les deux expérimentations, et selon les conditions expérimentales, nous avons aussi associé sur le même profil, un groupe contrôle de personnes voyantes gardant les yeux ouverts (voy).

Ainsi, pour chaque individu nvn, nous avons sélectionné un individu nvt, vpv, et voy de même âge (avec une différence au maximum de 10 années entre les 4 personnes des 4 groupes expérimentaux), de niveau d'étude ou de situation socio-professionnelle comparables et de sexe identique.

Pour constituer les groupes expérimentaux de personnes non-voyantes, nous avons fait appel à plusieurs associations de la région parisienne ; en particulier, l'Association Valentin Haüy (AVH) ou la Fédération des Aveugles de France (FAF).

Dans cette recherche, nous avons voulu mettre à l'épreuve les données obtenues dans des tâches d'imagerie mentale jusqu'alors proposées à des personnes voyantes. Nous avons voulu évaluer l'influence d'une privation visuelle (précoce ou tardive, temporaire ou définitive) dans des tâches d'imagerie mentale, par comparaison avec des personnes disposant d'un système visuel intact. Notre premier objectif a été de répliquer certaines données obtenues dans la littérature en s'assurant que notre protocole était valide (*expérience 1*). En outre, c'est la raison pour laquelle dans les expérimentations où l'apprentissage de la configuration se faisait par description verbale, nous avons fait passer l'expérimentation à des personnes voyantes, avec pour consigne de garder les yeux ouverts durant la phase expérimentale. Nous avons ainsi confronté nos résultats en comparant les données obtenues par les personnes voyantes privées temporairement de vision (vpv) et voyantes gardant les yeux ouverts (voy), à celles des personnes voyantes obtenues dans la littérature (Denis et

Cocude, 1992). En effet, dans les études existantes, aucune consigne spécifique n'avait été formulée aux participants quant au fait de garder ou non les yeux ouverts durant la tâche expérimentale.

Notre second objectif a été d'évaluer l'impact d'une privation précoce d'expérience visuelle sur les capacités d'imagerie mentale, par comparaison avec une privation visuelle survenant tardivement dans la vie de l'individu. Ainsi, nous avons confronté l'interprétation des données issues des expérimentations proposées aux personnes voyantes à celles obtenues chez des personnes non voyantes. A cet effet, nous avons proposé ces tâches d'exploration mentale de distances et de comparaison mentale de distances à des personnes non-voyantes de naissance d'une part et non-voyantes tardives d'autre part.

Les données issues de l'*expérience 1* ont été soumises à des analyses du coefficient de corrélation entre les temps de réponse et les distances, ainsi qu'à des analyses de variance (ANOVA, STATISTICA, version 6.0, www.statsoft.com) à trois variables indépendantes (modalité d'acquisition, groupe, distance) et une variable dépendante (temps de réponse).

Dans le cas d'un effet significatif d'une des variables indépendantes ou de leurs interactions (groupe x distance, par exemple), cette analyse a ensuite été suivie par une analyse post-hoc, test de comparaison multiple deux à deux, le test *F* de Scheffé.

Chapitre 5

Exploration mentale de distances (*expérience 1*)

Nous avons proposé une tâche d'exploration mentale de distances à des personnes voyantes, gardant les yeux ouverts durant la tâche expérimentale ou privées temporairement de vision. La privation artificielle de la vision a été réalisée à l'aide d'un bandeau posé par l'expérimentateur sur les yeux des participants. Nous avons proposé cette expérimentation en la soumettant à ces deux groupes puisque dans les études de référence (Kosslyn et al., 1978, Denis et Cocude, 1992), les auteurs n'avaient pas explicitement invité les participants à garder les yeux ouverts ou fermés. Parallèlement, nous avons fait varier la modalité (description verbale ou exploration tactile) de l'apprentissage de la configuration sur laquelle devait porter la tâche d'exploration mentale.

La même procédure expérimentale a été proposée à des personnes non-voyantes de naissance et tardives, et voyantes afin de nous informer sur l'influence de l'expérience visuelle dans la résolution de ces tâches, mais surtout pour révéler l'existence éventuelle de l'analogie de structure entre leurs représentations mentales et la configuration dont les représentations étaient issues.

5.1. Méthode

5.1.1. Participants

Quatre-vingt quatre personnes, âgées de 21 à 63 ans, ont participé à cette expérimentation, réparties pour chacune des deux conditions, en quatre groupe de douze individus : non-voyants de naissance (nvn), non-voyants tardifs (nvt), voyants privés temporairement de vision (vpv), et voyants les yeux ouverts (voy). Chacun d'entre eux a été testé dans l'une des deux conditions expérimentales (description verbale, exploration tactile).

La cécité des participants nvn était consécutive soit à un glaucome, soit à une rétinite pigmentaire congénitale, à des carences nutritives, soit au trop plein d'oxygène dans la couveuse. Certains des participants nvn ignoraient l'origine de leur cécité.

Pour les personnes nvt, la privation tardive de leurs capacités visuelles pouvait résulter d'une atrophie du nerf optique (nerf crânien II), d'une cataracte congénitale, d'un glaucome, d'une tumeur bilatérale de l'œil, consécutives à des pathologies ou encore faire suite à divers accidents. Le groupe des participants nvt se compose de personnes ayant perdu la vue entre l'âge de 6,5 ans et 30 ans (en moyenne 17 ans).

Un appariement de critères requis (âge (au maximum dix ans de différence), sexe, niveaux socioculturel et d'études) a été effectué entre les participants des quatre groupes pour la condition "description verbale" (nvn, nvt, vpv, voy) et des trois groupes pour la condition "exploration tactile" (nvn, nvt, vpv).

Tous les participants ont signé un consentement de participation à l'expérimentation et reçu une compensation financière pour leur participation à l'étude.

5.1.2. Matériel expérimental

Le matériel utilisé dans l'expérimentation était adapté de celui créé par Denis et Cocude (1992), et était le même dans les deux conditions d'apprentissage.

Un texte était écrit qui décrivait une île circulaire. Sur la périphérie de cette île, six détails géographiques étaient disposés (un port, un phare, une crique, une hutte, une plage et une grotte) à des emplacements précis, définis selon le codage horaire, permettant de lever toute ambiguïté quant à la localisation exacte. Les six détails étaient disposés de telle façon que toutes les distances entre chaque pair de détails adjacents différentes les unes des autres.

Dans une des conditions, les éléments appartenant à la configuration étaient proposé oralement au participant, en suivant le sens des aiguilles d'une montre, et en commençant par le port. La consigne délivrée au participant pour lui permettre de se créer une représentation mentale de l'île était la suivante : "Commencez par vous représenter mentalement l'île. Cette île est de forme circulaire. Le premier détail que vous devez inscrire sur le pourtour de l'île, est un port qui se trouve placé à 11 heures.

- A 1 heure, il y a un phare.
- A 2 heures, il y a une crique.
- A mi-distance entre 2 heures et 3 heures, il y a une hutte.
- A 4 heures, il y a une plage.
- A 7 heures, il y a une grotte."

Dans l'autre condition, les différents détails géographiques étaient représentés par des aimants situés sur la périphérie d'un disque en métal (présenté verticalement, 50cm de diamètre). Les aimants étaient identiques et positionnés selon le même codage horaire.

Deux listes de paires d'items ont été créées pour l'expérimentation. La moitié des participants traitaient la liste 1 puis la liste 2 ; alors que l'autre moitié traitaient d'abord la liste 2 puis la liste 1.

Chaque liste était composée de soixante paires de détails. Chaque détail était nommé 10 fois, et suivis 3 secondes plus tard par un second mot. Sur cinq de ces essais, le second mot désignait un détail qui n'était pas présent sur l'île. Les "faux" détails ont cependant été choisis car ils pouvaient "naturellement" être présent sur une île (pré, pont, puit, mine et lande). Sur les cinq derniers essais, le second mot désignait l'un des quatre autres éléments présents sur l'île (port, phare, crique, hutte, plage, grotte).

Ainsi, chaque paire de détails était présentée deux fois. Cependant, dans deux paires de détails successives, nous avons pris soin de faire en sorte que le second "vrai" élément ne soit jamais le même, et de la même manière que trois "vrais" ou "faux" détails ne puissent se succéder.

La présentation du second mot déclenchait un chronomètre, et en cas de non réponse du participant, 8 secondes après l'énoncé du second mot, un nouvel essai était présenté.

La phase test était précédée de 8 essais permettant aux participants de s'entraîner à la tâche, (4 "vrais", et 4 "faux" détails).

Dans la phase d'entraînement, une carte en relief de la France à été utilisée (présentée horizontalement sur une planche en bois). Six villes, signalées par des punaises, ont été mise en relief sur sa périphérie (Brest, Dunkerque, Strasbourg, Nice, Marseille et Bordeaux). Après deux essais d'entraînement, une liste de 10 paires de noms de villes était soumise au participant, (dont la seconde ville appartenait pour la moitié des cas aux villes apprises précédemment, et dans l'autre moitié des cas, étaient des villes étrangères : Lisbonne, Madrid, Venise et Berlin).

5.1.3. Procédure

L'expérimentation a été proposée grâce à un logiciel expérimental développé par Cédric Coussinet (Etudiant en thèse d'informatique, LIMSI-CNRS). Les passations étaient individuelles et proposées sur un ordinateur portable (TOSHIBA, Satellite Pro 4600). Les

réponses des participants fournies durant les phases d'acquisition et de test ont été recueillies grâce au clavier de l'ordinateur, enregistrant aussi bien les touches pressées par les participants, que les temps de réponses associés. Une fois la passation de l'expérience terminée, les participants étaient invités à remplir un questionnaire post-expérimental. Ce questionnaire a été utilisé pour s'assurer que les participants ne déduisaient pas le but ou les prédictions (relation entre les temps de réaction et les distances à explorer mentalement) de l'expérience, et qu'ils avaient bien suivi les instructions, au moins dans 75% des cas.

Les participants qui ont inféré le but ou la relation attendue entre les temps de réaction et les distances à explorer, ou bien ayant suivi moins de 75% du temps les consignes, ont été écartés des groupes expérimentaux et remplacés.

5.1.3.1 *Principe* : la tâche d'exploration mentale de distance consistait pour un participant, après avoir mémorisé la configuration d'un environnement spatial, à parcourir mentalement différentes distances séparant deux éléments présents sur cette configuration.

5.1.3.2 *Questionnaire* : afin d'appréhender au mieux les différences interindividuelles des participants, nous avons tout d'abord proposé un questionnaire verbal visant à recueillir des informations personnelles comme l'origine de la cécité, leur niveau d'études, etc.

5.1.3.3 *Phase d'entraînement* : afin d'entraîner les participants à effectuer la tâche, l'expérimentation débutait par une phase d'exploration mentale de distances entre six villes situées sur la périphérie de la carte de France (Brest, Dunkerque, Strasbourg, Nice, Marseille et Bordeaux). Les participants se remémoraient cette carte en explorant tactilement une carte en relief. Ils avaient ensuite pour tâche de se représenter mentalement la position de deux villes qui étaient énoncées, puis d'effectuer mentalement le parcours permettant de partir de la première ville, d'atteindre la seconde. Dès que ce parcours mental avait été réalisé, le participant le signifiait en appuyant sur un bouton (attribué à sa main dominante). Afin d'éviter que le participant ne perde sa concentration et n'automatise ses réponses sans effectuer de parcours mental, nous avons ajouté autant de paires de villes dont la seconde était erronée, qu'il y en avait de correctes. Nous avons ainsi proposé comme secondes villes, des villes de pays étrangers (Lisbonne, Madrid, Berlin, par exemple). Nous n'avons pas proposé d'autres villes françaises pour ne pas créer d'ambiguïté pour le participant. Ainsi, si la

deuxième ville entendue était une ville de pays étranger, le participant devait directement appuyer sur le deuxième bouton (main non dominante). La réponse du participant (bouton appuyé) ainsi que les temps de réponses associés étaient enregistrés.

5.1.3.4. *Phase d'acquisition* : Les consignes ont été délivrées aux participants par voie orale dans les deux conditions. En revanche, nous n'avons proposé la tâche au groupe voy que dans la condition "description verbale". Ce groupe avait été constitué pour être comparé à celui des vpv, et ainsi confronté aux données de la littérature.

- Description verbale

Après avoir effectué l'entraînement sur la carte de France, le participant apprenait une nouvelle configuration. Il s'agissait d'une île, de forme circulaire, dont il pouvait appréhender la dimension grâce à un disque en métal de 50 cm de diamètre présenté face à lui et qu'il explorait tactilement pendant une quinzaine de secondes environ.

Ensuite, l'expérimentateur indiquait oralement la position de 6 détails géographiques situés sur la périphérie de l'île, en utilisant la méthode du cadran horaire, utilisée dans la navigation aérienne. Par exemple "sur le pourtour de l'île se trouve un port, situé à 11 heures". Le participant avait pour tâche de se créer mentalement une représentation de l'espace décrit et de positionner sur sa périphérie les 6 détails à leurs emplacements exacts. La même description était proposée successivement par trois fois afin de s'assurer que le participant ait bien appris la configuration décrite par l'expérimentateur. Ce dernier demandait ensuite au participant de lui redonner la description de l'ensemble de l'île et la position de chacun des détails situés sur sa périphérie. Si l'apprentissage n'avait pas été suffisant, l'expérimentateur décrivait une nouvelle fois l'environnement à mémoriser, et ceci jusqu'à ce que le participant soit capable de redonner une description correcte de la configuration de l'île.

La consigne délivrée au participant était la suivante :

"Commencez par vous représenter mentalement le contour de l'île, c'est-à-dire un grand cercle, à la dimension que je vous ai indiquée.

Le premier détail que vous devez inscrire sur le pourtour de cette île est un port, qui se trouve placé à 11 heures.

Formez la représentation mentale d'un port et placez la à 11 heures.

Est-ce que vous vous représentez bien un port situé à 11 heures ?

Il est important que vous ayez bien une représentation du port à son emplacement.

A 1 heure, il y a un phare. Vous représentez vous bien un phare situé à 1 heure ?

A 2 heures, il y a une crique.

A un point situé à mi-distance entre 2 heures et 3 heures, il y a une hutte.

A 4 heures, il y a une plage.

A 7 heures, il y a une grotte."

- Exploration tactile

Le disque en métal représentant l'île a été divisé à l'aide de petits scratches juste sur la périphérie selon la référence du codage horaire. Nous avons fait ce choix afin de permettre aux participants d'avoir un référentiel équivalent entre les deux conditions. Afin de ne suggérer aucun trans-codage verbal de l'information, nous n'avons pas mentionné aux participants que la répartition des scratches suivait le codage horaire, nous les avons simplement informé de leur présence sur la périphérie du cercle.

Après avoir effectué l'entraînement sur la carte de France, le participant apprenait donc une nouvelle configuration. Il s'agissait de la même île que dans la première condition, l'expérimentateur proposait donc le même disque en métal de 50 cm de diamètre présenté verticalement face au participant. Dans un premier temps, il s'agissait pour lui de l'explorer tactilement pour en appréhender la taille et pouvoir mentalement se représenter l'île.

L'expérimentateur plaçait ensuite six aimants sur la périphérie du cercle, aux emplacements correspondant à la description horaire donnée dans la condition 1 (11h, 1h, 2h, entre 2h et 3h, 4h et 7h). Afin que le participant puisse se représenter la configuration de l'île dans des conditions équivalentes à la condition 1, l'expérimentateur déplaçait la main dominante du sujet, d'aimant en aimant, en indiquant à chaque fois à quel point de repère il était fait référence. L'expérimentateur prenait soin d'avoir un rythme équivalent dans cette condition à celui du débit de parole de la condition "description verbale".

Une fois que le participant considérait avoir mémorisé la position relative des différents détails sur la périphérie du cercle (sans limite temporelle imposée), l'expérimentateur rassemblait les aimants, et demandait au participant de les repositionner de manière exacte à leur emplacement initial. Les aimants étaient tous identiques de façon à ne pas induire chez les participants une représentation prédéfinie des objets à mémoriser et s'approcher au plus près de la condition "description verbale".

Après que le participant ait placé les six aimants, l'expérimentateur corrigeait les erreurs de placement éventuelles en dirigeant la main du participant (tenant l'aimant mal positionné) jusqu'à sa position correcte. Une fois que la configuration initiale était retrouvée,

le participant était de nouveau invité à explorer tactilement la configuration et exécuter de nouveau l'ensemble de la procédure précédemment décrite, jusqu'à un apprentissage correct.

La consigne délivrée au participant était la suivante :

"Commencez par vous représenter mentalement le contour de l'île, c'est-à-dire un grand cercle, à la dimension que je vous ai indiquée.

Le premier détail que vous venez de rencontrer est un port.

Essayer de vous former la représentation mentale d'un port et placez la mentalement sur l'île au même emplacement.

Est-ce que vous vous représentez bien mentalement un port situé à cet endroit sur la périphérie de l'île ?

Ensuite, le détail que vous venez de rencontrer est un phare. Vous représentez vous bien un phare situé au même endroit ?

Ensuite, il y a une crique.

Une hutte.

Une plage.

Et enfin il y a une grotte."

5.1.3.5. *Phase expérimentale* : une fois que l'environnement était appris par le participant, l'expérimentateur lui proposait une tâche d'exploration mentale.

Le participant avait pour tâche de se remémorer la configuration précise de l'île, en prenant soin de bien repositionner mentalement les six détails situés sur sa périphérie. Il était informé qu'il allait entendre le nom d'un premier détail situé sur l'île et qu'il devrait mentalement se positionner à cet endroit. Il entendrait ensuite un second détail à un intervalle de temps de 4 sec après la première information. Dans la moitié des cas, le second détail appartenait lui aussi à la configuration initiale. Dans ce cas, il devrait mentalement imaginer un petit point qui se déplace, à vitesse constante, depuis le premier détail jusqu'au second détail, et ensuite signifier que le trajet avait bien été parcouru. En revanche, dans l'autre moitié des cas, le second détail énoncé n'appartenait pas à la configuration de l'île. Dans ce cas-ci, les participants devaient appuyer directement sur l'autre bouton (main non dominante), pour spécifier que le détail en question n'appartenait pas à la configuration initialement apprise. Pour cela, le participant disposait d'un clavier où seules 2 touches étaient disponibles, correspondant aux positions des mains gauche et droite du participant. Le logiciel d'expérimentation a été conçu de telle sorte que les réponses correspondant à un trajet mental entre deux détails de la configuration étaient effectuées par la main dominante du participant.

Ainsi, les deux conditions d'apprentissage étaient passives, séquentielles, et utilisaient le même référentiel. De plus, nous nous sommes assurés du bon apprentissage de la configuration en demandant à chaque participant de nous redonner la description de la configuration (dans la condition par description verbale), ou bien de replacer les aimants sur le disque (dans la condition par exploration tactile).

Tous les participants ont été testés individuellement et interviewés à la fin de l'expérimentation. Deux participants ayant rapporté avoir suivi les instructions d'imagerie mentale moins de 75% du temps durant la phase test ont été exclus et remplacés. De plus, il était demandé aux participants si, avant d'effectuer leur parcours mentaux jusqu'au second détail, ils se rendaient à la localisation de ce détail au sein de leur représentation de la configuration, ou bien s'ils se basaient sur le codage horaire pour retrouver la localisation du détail en question. Un participant, nous ayant rapporté s'être référé au codage horaire a été exclu et remplacé.

5.2. Analyse des résultats (*expérience 1*)

Seules les analyses sur les réponses correctes ont été ici analysées. En effet, nous nous sommes limités à l'analyse des temps de réactions dans les essais où les participants avaient effectivement exploré la distance séparant deux détails situés sur la configuration de l'île. Le nombre d'erreurs commise par l'ensemble des participants est extrêmement faible (en moyenne 0,7% des essais), et traduit principalement des erreurs d'inattention (selon les réponses au questionnaire post-expérimental).

Avant de commencer l'analyse, nous avons supprimé les valeurs extrêmes, définies par tous les temps de réaction supérieur ou inférieur de deux écarts-types à la moyenne de cette condition pour un participant donné. En d'autres termes, pour une distance donnée et un participant bien particulier, si un de ses temps de réponse est supérieur ou inférieur de deux écart-types à la moyenne des temps de réponse pour cette distance, et pour ce participant, alors ce temps de réaction est éliminé. Ces valeurs extrêmes ont été remplacées par la valeur de la moyenne des temps de réponse plus 2 écart-types ou moins 2 écart-types selon qu'elles étaient supérieures ou inférieures à la moyenne.

Les graphiques suivants, présentant les droites de régression selon les différents groupes de participants, chaque point représente la moyenne de l'ensemble des observations pour chacune des 10 distances. Le plan expérimental était le suivant: $S12 < G3 * C2 > * D10$ (Des groupes de 12 participants (S12) répartis chacun dans un des 3 groupes expérimentaux (G3), selon une des deux conditions d'apprentissage (C2), effectuaient tous des explorations mentales sur 10 distances (D10)).

Nous avons tout d'abord effectué auprès de nos trois groupes expérimentaux une analyse de variance qui révèle un effet des distances sur les temps de réaction, $F(9, 297) = 10,042$; $p \sim 0$. Les temps de réaction varient donc bien en fonction des différentes distances qui séparent les différents détails présents sur la configuration spatiale.

5.2.1. Chez les participants voyants avec ou sans privation de vision

L'analyse de variance montre que les participants voyants privés temporairement de vision, et les participants à qui nous avons demandé explicitement de garder les yeux ouverts durant les tâches expérimentales mettent le même temps pour effectuer les parcours mentaux.

Ainsi, si l'on s'intéresse aux participants voyants (qu'ils appartiennent au groupe des voy ou vpv), les résultats indiquent que la durée d'exploration mentale de distances entre deux détails appartenant à la configuration verbalement décrite (détails de l'île) est significativement corrélée à la distance qui sépare ces deux détails ($r(8) = 0,89$; $p < 0,01$; Fig. 1).

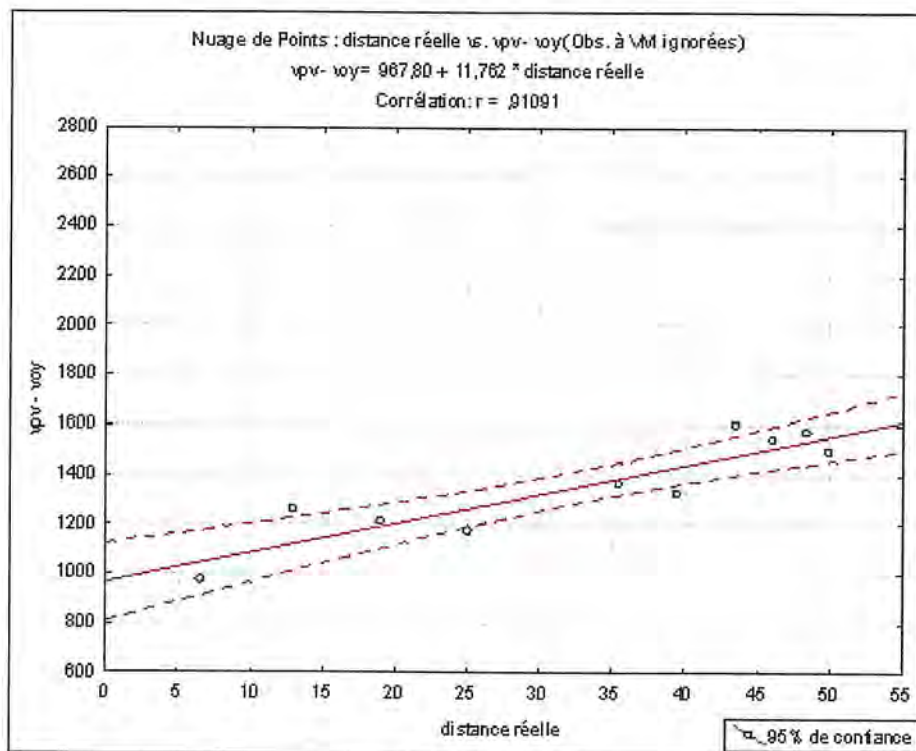


Figure 1 : Droite de régression issue des données obtenues par les participants voyants ou artificiellement privés de vision pris ensemble, à la suite d'une description verbale.

La similitude entre ces résultats et ceux obtenus par Kosslyn et al. (1978) a apporté un argument en faveur de la validité de la procédure expérimentale utilisée pour réaliser l'expérience 1.

5.2.2. Chez les participants voyants privés de vision

Les données montrent qu'une relation linéaire associe le temps mis pour explorer mentalement une distance à la longueur de cette distance chez les participants voyants privés de vision. La corrélation entre le temps de parcours mental et la distance à parcourir est significative dans les deux procédures d'apprentissage de la configuration, à la suite d'une description verbale ($r(8) = 0,92$; $p < 0,01$; Fig. 2A) et exploration tactile ($r(8) = 0,96$; $p < 0,01$; Fig. 2B).

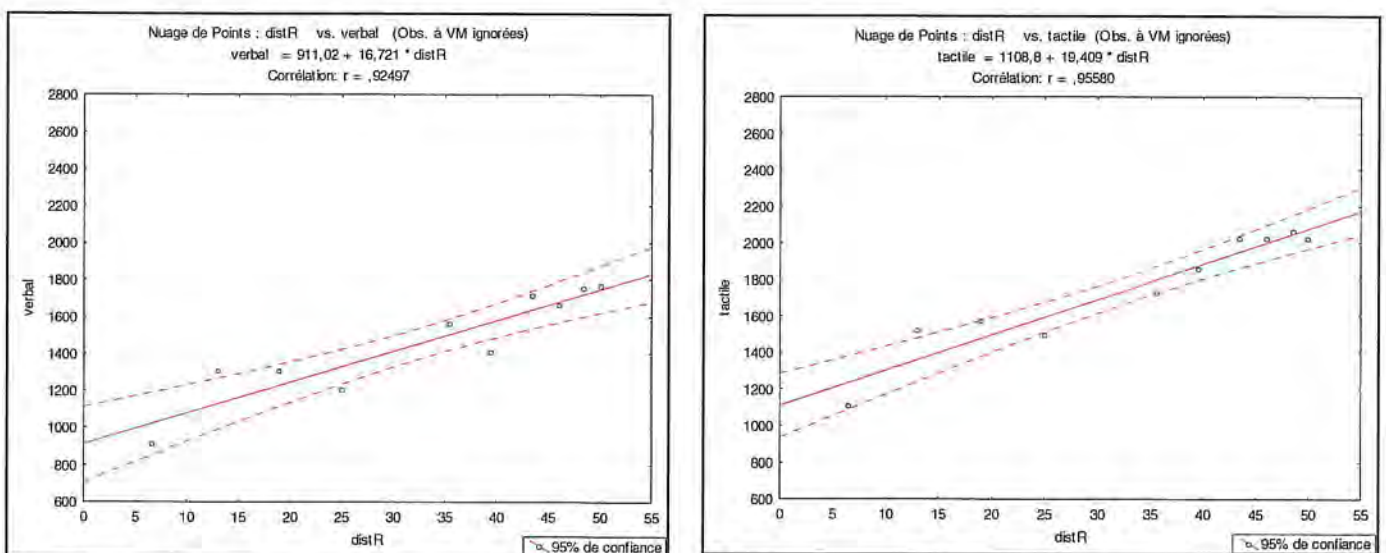


Figure 2 : Droite de régression issue des données obtenues par les participants voyants privés de vision, suite à une description verbale (Fig. 2A, à gauche) et suite à une exploration tactile (Fig. 2B, à droite) de la configuration mémorisée.

L'analyse de variance ne montre aucune différence significative dans les temps de parcours mentaux : les temps nécessaires aux voyants privés temporairement de vision pour réaliser la tâche sont similaires, quel que soit le type d'apprentissage.

Même si le temps d'exploration mentale varie en fonction de la distance à parcourir, l'analyse des figures indique que le temps minimal requis pour initialiser la tâche d'exploration mentale est plus court après une description verbale de la configuration (911 ms) qu'à la suite d'une exploration tactile (1109 ms), soit un écart moyen de 198 ms.

5.2.3. Chez les participants non-voyants tardifs

Pour les individus privés de vision tardivement au cours du développement, les résultats indiquent une corrélation significative entre le temps et la distance à parcourir mentalement, quelle que soit la condition expérimentale, par description verbale ($r(8) = 0,79$; $p < 0,01$; Fig. 3A, à gauche) ou exploration tactile de la configuration ($r(8) = 0,70$; $p < 0,05$; Fig. 3B, à droite).

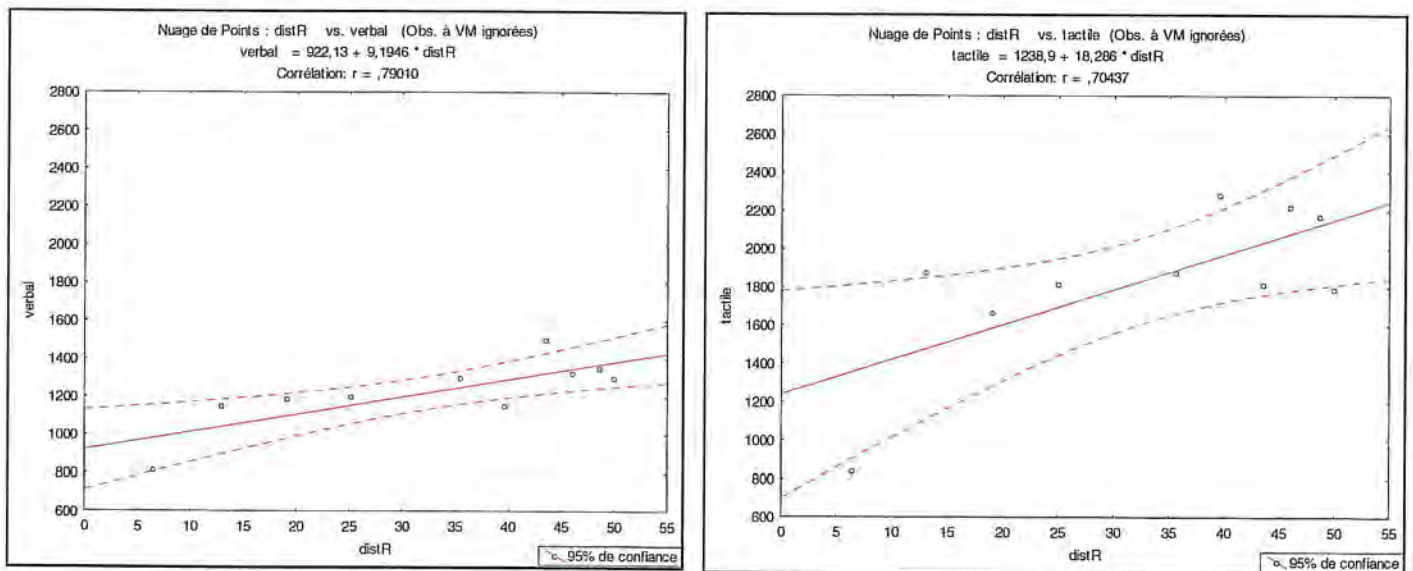


Figure 3 : Droite de régression obtenue par les participants non - voyants tardifs, suite à une description verbale (Fig 3A, à gauche) et suite à une exploration tactile (Fig 3B, à droite) de la configuration à mémoriser.

L'analyse de variance révèle que le temps moyen d'exploration s'approche de la significativité ($F(1,22) = (3, 313)$; $p = 0,082$), suggérant que l'exploration tactile de l'environnement engendrerait des temps d'exploration plus long que sa description verbale chez les participants non-voyants tardifs.

Comme précédemment, le temps moyen minimal requis pour initialiser le processus d'exploration mentale tend à être plus court dans le cas d'un apprentissage par description verbale (922 ms), que dans le cas d'une acquisition par exploration tactile (1239 ms), soit un écart temporel de 317 ms.

5.2.4. Chez les participants non-voyants de naissance

Les résultats montrent que la durée d'exploration mentale de distances ne varie pas linéairement en fonction du temps chez les participants non-voyants de naissance, contrairement à tous les autres participants de l'*expérience 1*.

L'absence de corrélation significative entre le temps de parcours mental et la distance se retrouve aussi bien après un apprentissage par description verbale ($r(8) = 0,39$; Fig. 4A) qu'après une acquisition par exploration tactile ($r(8) = 0,46$; Fig. 4B). Par ailleurs, l'analyse de variance ne montre aucune différence entre ces deux conditions, suggérant que les participants dépourvus d'expérience visuelle précoce mettent le même temps pour résoudre la tâche.

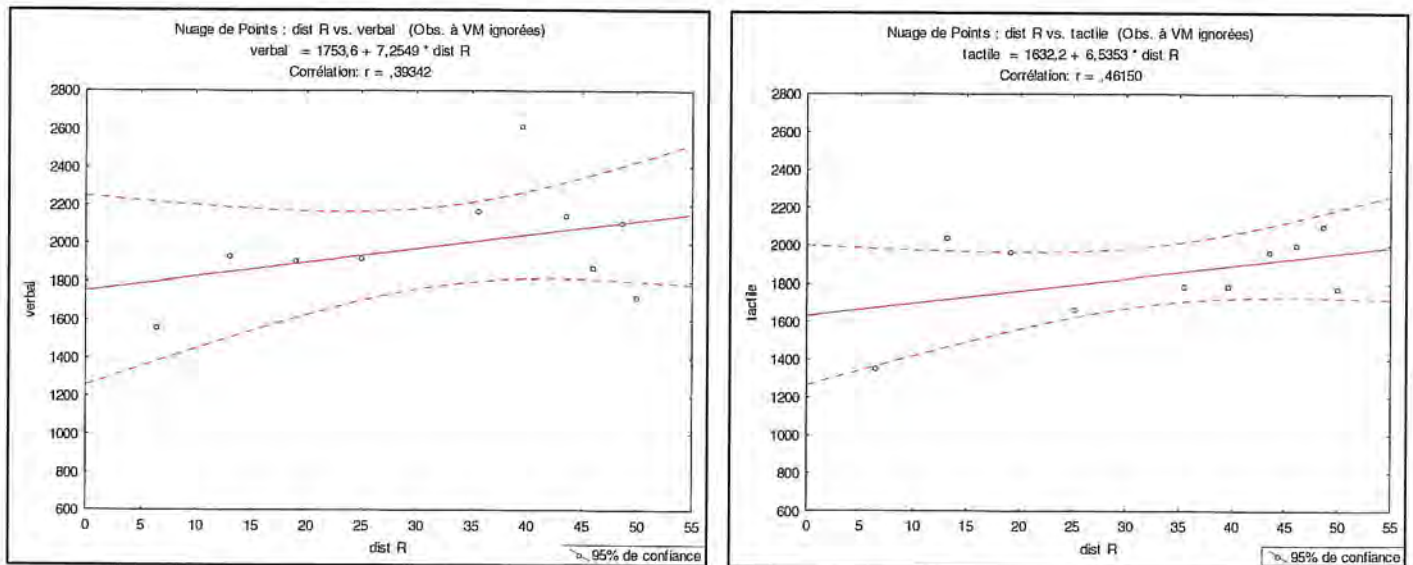


Figure 4 : Droite de régression obtenue par les participants non - voyants de naissance, suite à une description verbale (Fig 4A, à gauche) et suite à une exploration tactile (Fig 4B, à droite) de la configuration à mémoriser.

En résumé des résultats principaux de l'*expérience 1*, nous montrons que la durée d'exploration mentale de distances réelles, inférieures à 50 cm, varie selon une fonction linéaire et croissante au fur et à mesure que la distance augmente, aussi bien pour les participants voyants (privés artificiellement ou non de vision) que pour ceux atteints de cécité tardive. Cela n'est pas le cas en revanche, si les participants naissent non-voyants. Le mode

d'apprentissage de la configuration à mémoriser (description verbale, exploration tactile) n'affecte pas la relation associant le temps d'exploration mentale et la distance à parcourir. Par ailleurs, les résultats indiquent que quel que soit le groupe auquel ils appartiennent, les participants mettent globalement des temps similaires pour effectuer leurs explorations de distance, que leur apprentissage soit issu d'une description verbale ou d'une exploration tactile. En revanche, il est à noter que pour le cas des personnes non-voyantes tardives, la description verbale de la configuration donne lieu à des temps d'exploration plus courts.

5.3. Discussion

Les données issues de la tâche d'exploration mentale de distances répliquent les résultats classiques obtenus par Denis et Cocude en 1992. Nous avons choisi dans un premier temps de comparer les données obtenues par le groupe des personnes voyantes (privées temporairement de vision, et gardant les yeux ouverts) afin de nous assurer de la validité de notre protocole expérimental. Dans l'expérience proposée par ces auteurs, il n'était pas spécifié aux participants de consigne particulière quant au fait de garder ou non les yeux fermés durant la tâche. Nous intéressés à l'effet de la vision sur ces performances, il nous a semblé important de nous assurer que le fait de priver temporairement de vision nos participants n'aurait pas d'incidence significative. Ainsi, le coefficient de corrélation que nous avons obtenu s'élève à $r = .91$, et celui obtenu par Denis et Cocude (1992) à $r = .90$. Nous pouvons donc considérer que notre protocole expérimental est valide et peut être comparé aux données issues de la littérature.

Les données que nous avons obtenues montrent que l'expérience visuelle précoce a une influence sur les mécanismes impliqués dans l'exécution des tâches d'exploration mentale. En effet, les participants ayant bénéficié d'une expérience visuelle précoce, qu'il s'agisse des participants voyants privés temporairement de vision, ou bien des non-voyants tardifs, montrent une corrélation positive entre les temps d'exploration mentale, et la distance à parcourir mentalement, aussi bien après un apprentissage de la configuration par description verbale que par exploration tactile. Bien que ce coefficient soit supérieur pour les participants voyants, il n'en demeure pas moins significatif dans les deux populations.

En revanche, et contrairement aux autres participants de l'*expérience 1*, nous n'obtenons pas de relation linéaire significative dans cette tâche lorsqu'elle est réalisée par des personnes qui n'ont bénéficié d'aucune expérience visuelle, et ceci, quelle que soit la modalité par laquelle la configuration ait été apprise.

Les données que nous avons obtenues chez les personnes ayant bénéficié d'une expérience visuelle sont donc en accord avec les données issues de la littérature qui montrent une corrélation positive entre les temps et les distances à parcourir mentalement, que ces données soient issues d'un apprentissage par description verbale ou perceptif (Kosslyn, 1978, 1980, 1983 ; Denis et Cocude, 1992). Les représentations mentales que peuvent créer les

individus ayant bénéficié d'une expérience visuelle possèdent donc des propriétés structurales qui sont caractéristiques des représentations de type analogique.

Pour le cas des personnes dépourvues d'expérience visuelle, nos données sont en désaccord avec celles issues des travaux de Nancy Kerr (1983), qui révélaient une corrélation forte entre le temps d'exploration mentale et la distance chez les personnes non-voyantes de naissance ($r = .987$) ainsi que chez les personnes voyantes ($r = .986$), bien que les non-voyants aient des temps de réponse significativement plus longs. La difficulté dans l'étude proposée par Kerr repose essentiellement sur le fait que, bien que les participants non-voyants soient tous considérés comme non-voyants congénitaux, les auteurs n'ont testé que quatre personnes totalement non-voyantes. En effet, sur les dix individus ayant participé à leurs tests, deux d'entre eux avaient une perception minimale de la lumière, et quatre autres étaient capables de voir les contrastes. De par le fait que les individus n'étaient pas capables de distinguer des personnes ou des objets visuellement, les auteurs ont considéré que tous étaient totalement non-voyants. Par ailleurs, dans leur étude la modalité d'acquisition de l'environnement différait selon que les individus étaient non-voyants (apprentissage par la voie tactile) ou voyants (apprentissage par perception visuelle).

Nos données vont aussi à l'encontre de celles obtenues en 1998, par Röder et Rösler dans leur tâche d'exploration mentale par appréhension tactile. En effet, les auteurs montraient dans cette étude une corrélation significative forte entre les temps de parcours mentaux et les distances parcourues, aussi bien chez les personnes non-voyantes de naissance ($r = .86$) que chez les personnes voyantes ($r = .91$), lorsque la configuration avait été apprise par exploration tactile. En revanche, aucune différence significative n'apparaissait dans les temps de réponse entre les deux groupes. Les individus qui composaient leurs groupes expérimentaux étaient au nombre de 12, avec un nombre égal d'hommes et de femmes, conditions que nous avons respectées dans notre étude. La différence principale porte en revanche sur la procédure utilisée.

Bien que cette procédure soit relativement similaire à celle que nous avons employée dans cette étude, les participants de l'étude de Röder et Rösler (1998) pouvaient explorer la configuration à mémoriser avec les deux mains, alors que dans notre étude, nous avons pris soin de déplacer la main de nos participants, de détails en détails. De cette façon, les participants acquéraient l'information au même rythme dans les deux conditions expérimentales, mais surtout cela empêchait le fait que par le recours à ses deux mains, le participant non-voyant (et aussi voyant) évalue dès la phase d'apprentissage les distances qui

séparent les différents points. Cette précaution permettait d'éviter ce qui nous apparaissait être un biais expérimental important dans l'évaluation de la métrique des représentations mentales.

En résumé, les résultats que nous avons obtenus en soumettant les participants voyants et non-voyants à une tâche d'exploration mentale de distances suggèrent que la privation d'expérience visuelle précoce influence de manière significative les propriétés structurales des représentations mentales. Nos données suggèrent par ailleurs, que ni un apprentissage par description verbale, ni par exploration tactile ne permet de retrouver chez ces individus non-voyants de naissance, une attestation de l'analogie entre leur représentation mentale et la configuration à mémoriser.

Nos résultats montrent en revanche que dès lors qu'un individu a bénéficié d'une expérience visuelle suffisante (au-delà des trois premières années de sa vie), alors, il pourra développer des représentations mentales analogues à son environnement, tout au moins conservant ses propriétés métriques.

Nous pouvons souligner néanmoins que la tâche d'exploration mentale de distances que nous avons utilisé, nous informe sur les temps de déplacements mentaux opérés par les participants entre différents points. En revanche, pour réaliser cette tâche, la consigne requiert clairement des participants d'imaginer un petit objet se déplaçant en ligne droite d'un point à un autre. Les participants non-voyants de naissance ont rapporté avoir eu des difficultés dans la réalisation de cette tâche, sur le fait même d'imaginer un trajet en ligne droite, alors qu'ils affirment ne pas avoir de difficultés à se représenter la scène qui leur avait été soit décrite, soit qu'ils avaient pu explorer tactilement.

Au regard de ces résultats, nous avons décidé de proposer une autre tâche nous permettant d'évaluer les propriétés métriques des représentations mentales. Nous avons choisi la tâche de comparaison mentale de distances, permettant cette évaluation, sans pour autant nécessiter le recours au déplacement mental en ligne droite, et permettant le recueil d'un nouvel indicateur au-delà des temps de réponse : le taux de réponses correctes.

Chapitre 6

Comparaison mentale de distances (*expérience 2*)

Nous avons adapté le matériel expérimental issu de l'expérimentation initiale développée par Denis et Zimmer (1992), afin de pouvoir le soumettre à des personnes non-voyantes. Le plan expérimental était le suivant: $S12 < G3 * C2 > *D3$ (Des groupes de 12 participants (S12) répartis chacun dans un des 3 groupes expérimentaux (G3), selon une des deux conditions d'apprentissage (C2), effectuaient tous des comparaisons mentales sur 3 types de différence de distances (D3)).

Nous avons proposé cette tâche à des personnes voyantes, gardant les yeux ouverts durant la tâche expérimentale (groupe contrôle) et privées temporairement de vision. La privation artificielle de la vision a été réalisée, comme dans *l'expérience 1* à l'aide d'un bandeau posé par l'expérimentateur sur les yeux des participants.

Cette expérimentation a été soumise à ces deux groupes dans la condition par description verbale, afin de pouvoir confronter nos données à celles de la littérature et notamment, à l'étude princeps de Denis et Zimmer (1992). Dans cette étude, aucune consigne spécifique (comme dans l'étude de Kosslyn et al, 1978, pour la tâche d'exploration mentale de distance de notre *expérience 1*) n'avait en effet été donnée aux participants pour les inviter à garder les yeux ouverts ou fermés.

Nous avons fait varier la modalité (description verbale ou exploration tactile) grâce à laquelle l'environnement était acquis. La même procédure expérimentale a été proposée à des personnes non-voyantes de naissance et non-voyantes tardives.

Les données issues de *l'expérience 2* ont été soumises à des analyses de variance (ANOVA, STATISTICA, version 6.0, www.statsoft.com) à trois variables indépendantes (modalité d'acquisition, groupe, distance) et à deux variables dépendantes (pourcentage de réponses correctes et temps de réponse).

Dans le cas d'un effet significatif d'une des variables indépendantes ou de leurs interactions (groupe x distance, par exemple), cette analyse a ensuite été suivie par une analyse post-hoc, test de comparaison multiple deux à deux, le test *F* de Scheffé.

6.1. Méthode

6.1.1. Participants

Quatre-vingt quatre participants ont participé à cette deuxième expérience et ont été répartis en douze individus par groupes (nvn, nvt et vpv, plus une groupe contrôle voy), chacun dans l'une des deux conditions expérimentales (description verbale, exploration tactile). Les origines de leur cécité, les critères requis en termes d'âge, de sexe, de niveaux socio-culturels et éducatifs sont ceux qui ont été utilisés dans l'expérience 1.

Dans ce cas, la condition "description verbale" comporte quatre groupes d'individus (nvn, nvt, vpv, voy) et la condition "exploration tactile" trois : nvn, nvt, vpv.

De la même manière que précédemment, nous avons respecté les règles définies dans le cadre de tests expérimentaux chez l'humain.

6.1.2. Matériel expérimental

L'expérience 2, proposée sur le logiciel E.R.T.S. (Experiment Run Time System) a été développée en Visual Basic sur un ordinateur de type Xybernaut, en collaboration avec Emilie Deyzac (alors étudiante en doctorat au LIMSI-CNRS). Les réponses des participants (durant les phases d'acquisition et expérimentale du test) étaient enregistrées par l'ordinateur portable mis alors à leur disposition, recueillant aussi bien les touches pressées par les participants, que les temps de réponses associés.

Une liste de 58 comparaisons de distances a été soumise à chaque participant. Il s'agissait de toutes les paires de distances ayant un détail en commun, par exemple, grotte-phare / grotte-crique. Seules les paires de détails correspondant à deux distances effectivement différentes ont été retenues. Les différences de distances ont été classées sur un continuum, de la plus petite jusqu'à la plus grande. Les distances concernées ont été exprimées en référence à la dimension du disque (50 cm de diamètre) qui était présenté au début de la phase d'apprentissage. Ces distances ont ensuite été regroupées en trois catégories :

- les petites différences (D1), incluant 17 items dont les valeurs sont inférieures à 8,6 cm,
- les différences moyennes (D2) incluant 21 items dont les valeurs sont comprises entre 8,6 et 17,2 cm,

- les grandes différences (D3), incluant 20 items dont les valeurs sont supérieures à 17,2 cm.

La consigne délivrée au participant pour lui permettre de se créer une représentation de l'espace sur lequel il aurait à effectuer la tâche de comparaison mentale de distances était la suivante : "Commencez par vous représenter mentalement l'île. Cette île est de forme circulaire. Le premier détail que vous devez inscrire sur le pourtour de l'île, est un port qui se trouve placé à 11 heures.

- A 1 heure, il y a un phare.
- A 2 heures, il y a une crique.
- A mi-distance entre 2 heures et 3 heures, il y a une hutte.
- A 4 heures, il y a une plage.
- A 7 heures, il y a une grotte."

6.1.3. Procédure

6.1.3.1. *Principe* : il est identique à celui utilisé dans le cadre de l'expérience I. Néanmoins, si précédemment la tâche consistait à explorer mentalement différentes distances, ici, les participants étaient invités à comparer mentalement la longueur de deux distances séparant des éléments présents sur cette configuration. Ils devaient décider laquelle des deux distances (en ligne droite) était la plus longue.

6.1.3.2. *Questionnaire* : il était identique à celui utilisé pour évaluer les explorations mentales de distances (*expérience I*).

6.1.3.3. *Phase d'entraînement* : pour entraîner le participant à effectuer la tâche, l'expérimentation débutait par une phase de comparaison mentale de distances entre 6 villes situées sur la périphérie de la carte de France (Brest, Dunkerque, Strasbourg, Nice, Marseille et Bordeaux). Les participants se remémorent cette carte en explorant tactilement une carte en relief. Ensuite, le participant doit décider quelle distance, entre deux distances énoncées, est la plus longue, Nice-Marseille ou bien Nice-Bordeaux par exemple ? Le participant avait pour tâche de se représenter mentalement la distance qui sépare les deux premières villes qui étaient énoncées, puis la distance séparant les deux autres villes. Il devait alors décider quelle distance était la plus longue et le signifier en appuyant sur une touche du clavier de l'ordinateur : si c'était la première distance qui était la plus longue, le participant devait

appuyer sur la touche de gauche, si c'était la seconde distance la plus longue, il devait appuyer sur la touche de droite.

6.1.3.4. *Phase d'acquisition* : les modes d'acquisition verbale ou d'exploration tactile ont de nouveau été utilisés dans ce cadre expérimental de la même manière que pour l'*expérience 1*.

6.1.3.5. *Phase expérimentale* : une fois l'environnement appris par le participant, l'expérimentateur lui proposait une tâche de comparaison mentale de distances.

Il s'agissait de décider entre 2 distances, quelle était la plus longue. Ainsi, à l'énoncé verbal de deux paires de distances, le participant était invité à se représenter mentalement une ligne droite reliant les deux premiers détails énoncés, et dans un second temps, se représenter mentalement une deuxième ligne droite reliant les deux autres détails ensuite énoncés. Si c'était la première distance qui était la plus longue, le participant devait appuyer sur la touche gauche du clavier. Si c'était la seconde, il devait appuyer sur la touche droite du clavier ; et cela, le plus rapidement possible. La phase de comparaison de distances se déroulait en présentant successivement deux séries de 28 comparaisons à effectuer. Entre chaque série, une pause de quelques minutes était proposée aux participants.

6.2. Analyse des résultats

6.2.1. Analyse des pourcentages de réponses correctes

Pour cette analyse expérimentale, nous avons comptabilisé les réponses correctes des participants. Ces informations, présentées sous la forme de pourcentages par souci de simplification, présentent l'avantage de nous informer sur la qualité de la représentation mentale des participants. En effet, plus le pourcentage de réponse correcte est élevé et plus cela signifie que les participants ont généré une représentation correcte de la configuration, i.e. en conservant les relations métriques entre les différents objets de la configuration.

6.2.1.1. Chez les participants voyants avec ou sans privation de vision

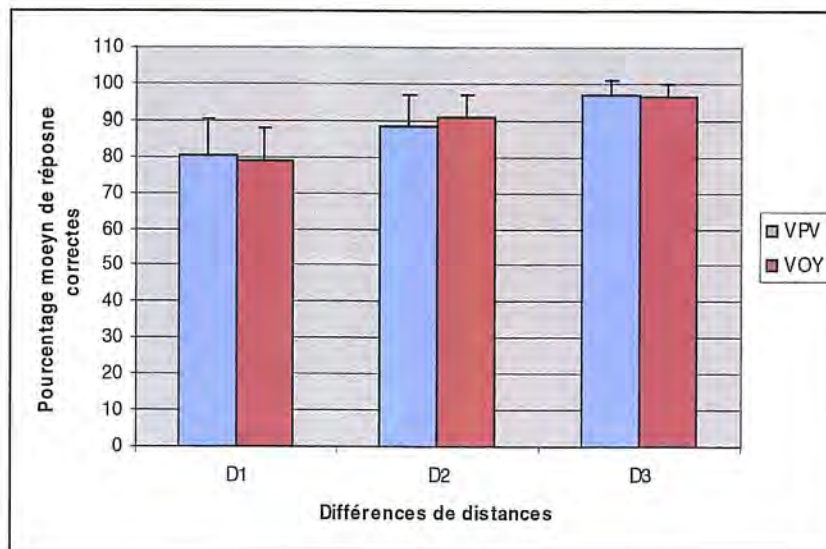


Figure 5: Pourcentage moyen de réponses correctes en fonction des différences de distances, et du groupe de personnes voyantes (sans bandeau sur les yeux "voy", ou avec "vpv").

Dans ce cas, nous avons procédé en une analyse comparative entre les données obtenues chez les voyants privés temporairement de vision et les voyants autorisés à utiliser leur capacité visuelle. Cela nous a permis de constater qu'il n'existe pas de différence significative entre les deux groupes de participants (Fig. 5).

6.2.1.2. Chez l'ensemble des participants

6.2.1.2.1. Analyse de la variable modalité d'acquisition

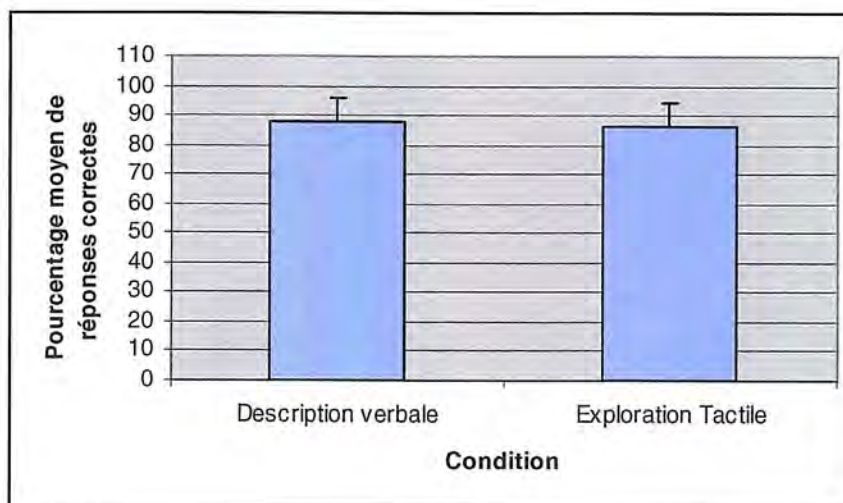


Figure 6: Pourcentage moyen de réponses correctes en fonction de la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration tactile), indépendamment du groupe (vpv, nvt, nvn), et de la différence de distances (petite, moyenne, grande).

Les données obtenues ne montrent pas de différences significatives entre les deux modalités d'acquisition de la tâche expérimentale. Ainsi, quelle que soit la modalité d'apprentissage verbal ou tactile de la configuration, celle-ci n'aura pas d'influence notable sur les pourcentages de réponses correctes des participants (Fig. 6).

6.2.1.2.2. Analyse de la variable groupe

L'analyse de la variable "groupe" montre qu'il n'apparaît pas de différence significative entre les groupes de participants (Fig. 7). Autrement dit, le degré de privation visuelle n'a pas significativement influencé les pourcentages de réponses correctes.

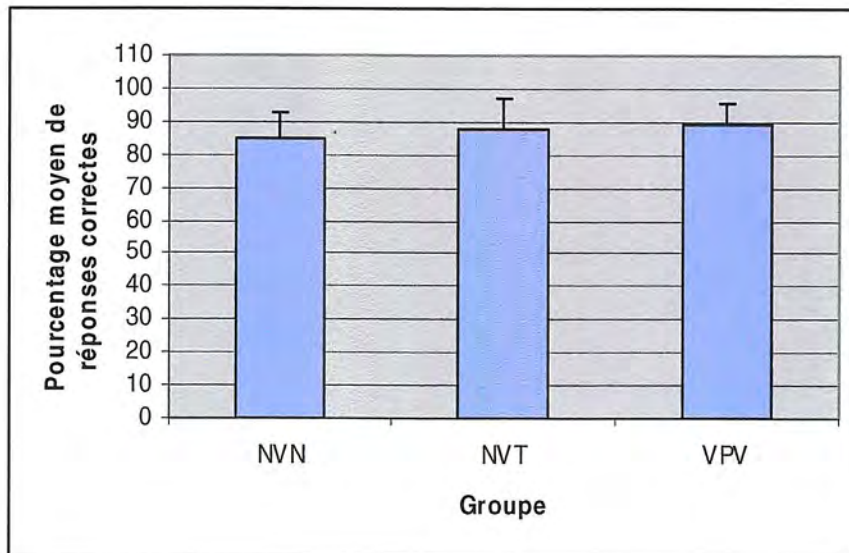


Figure 7: Pourcentage moyen de réponses correctes en fonction du groupe (vpv, nvt, nvn), et indépendamment de la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration tactile) et de la différence de distances (petite, moyenne, grande).

6.2.1.2.3. Analyse de la variable distance

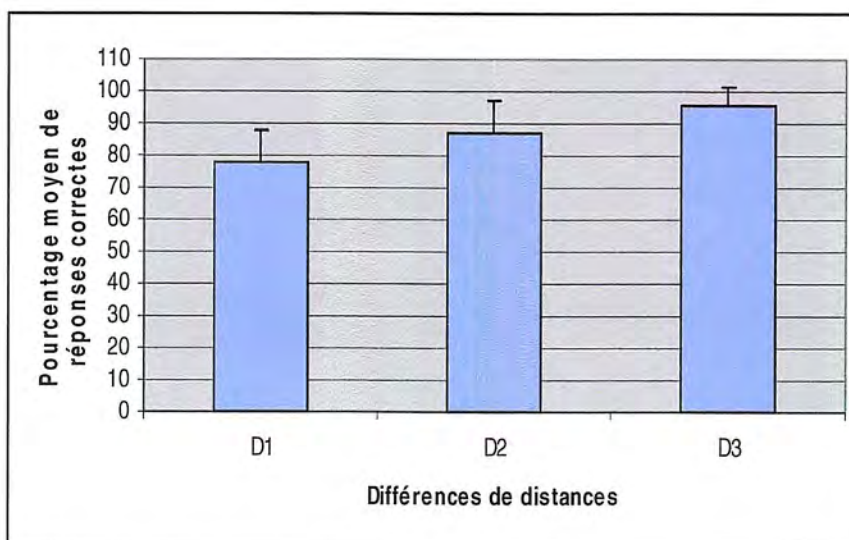


Figure 8: Pourcentage de réponses correctes en fonction de la différence de distances (petite, moyenne, grande), indépendamment de la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration tactile), et du groupe expérimental (nvn, nvt, vpv).

Les résultats montrent que le pourcentage de réponses correctes varie significativement en fonction des différences de distances, ($F_{(2,132)} = 113,61$; $p \sim 0$; Fig. 8). Une analyse post-hoc montre que les petites différences de distances sont traitées différemment des moyennes (D1 et D2 ; $p \sim 0$), et des grandes (D3 ; $p \sim 0$; Fig. 8). De manière similaire, le pourcentage de réponses correctes est significativement différent entre les moyennes et les grandes différences de distances (D2 et D3 ; $p \sim 0$; Fig. 8). Ainsi, plus la différence entre deux distances est grande, plus le pourcentage de réponses correctes est élevé indépendamment du groupe d'appartenance des participants et de la modalité d'acquisition de la configuration.

6.2.1.2.4. Analyse de l'interaction entre les variables groupe et distance

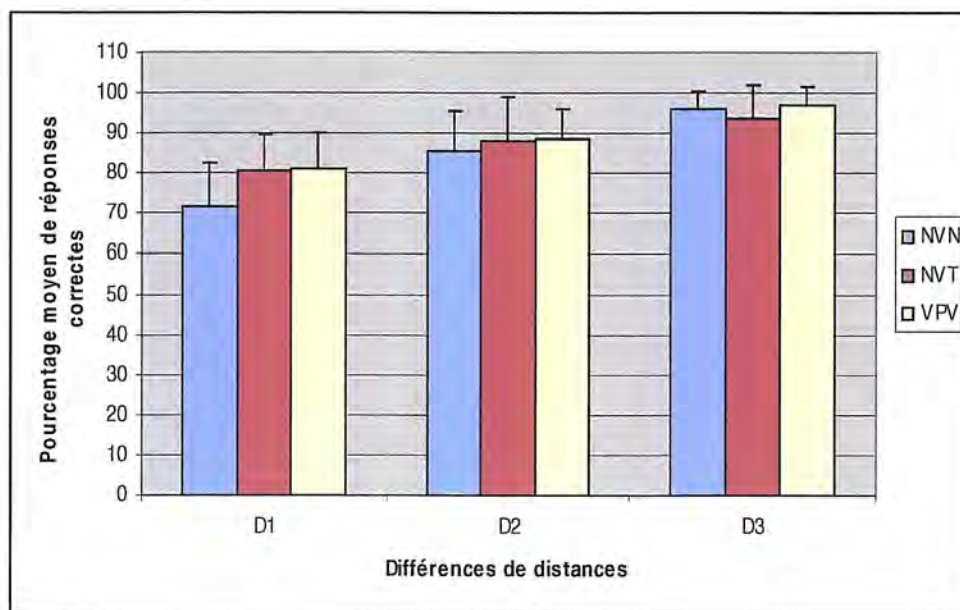


Figure 9: Pourcentage de réponses correctes par groupe (nvn, nvt, vpv), en fonction de la différence de distances (petite, moyenne, grande), et indépendamment de la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration tactile).

L'analyse de variance révèle une interaction significative entre les variables groupe et distance ($F_{(4,132)} = 4,3973$; $p < 0,0023$; Fig. 9).

Les analyses détaillées indiquent que les pourcentages de réponses correctes associées aux petites différences de distances (D1) dépendent du groupe auquel appartiennent les

participants ($F(2, 44) = 7,5158 ; p = 0,00156$). Une analyse à postériori des données montre que lorsqu'il s'agit de comparer deux distances dont la différence est petite, les personnes privées d'expérience visuelle précoce font significativement plus d'erreurs que les personnes privées tardivement de la vue ($p < 0,0085$) et que les personnes voyantes (ici avec un bandeau sur les yeux ; $p < 0,0052$). En revanche, il n'apparaît pas de différence entre les nvt et vpv dans les pourcentages de réponses correctes associées aux petites différences de distances. Pour ce qui est des moyennes et grandes différences de distances (respectivement D2 et D3), aucun effet significatif n'apparaît entre les différents groupes.

6.2.1.3. Chez les voyants privés de vision

6.2.1.3.1. Analyse de la variable modalité d'acquisition

Les pourcentages de réponses correctes des personnes privées temporairement de vision ne varient pas significativement en fonction du mode d'apprentissage par description verbale ou exploration tactile (Fig. 10).

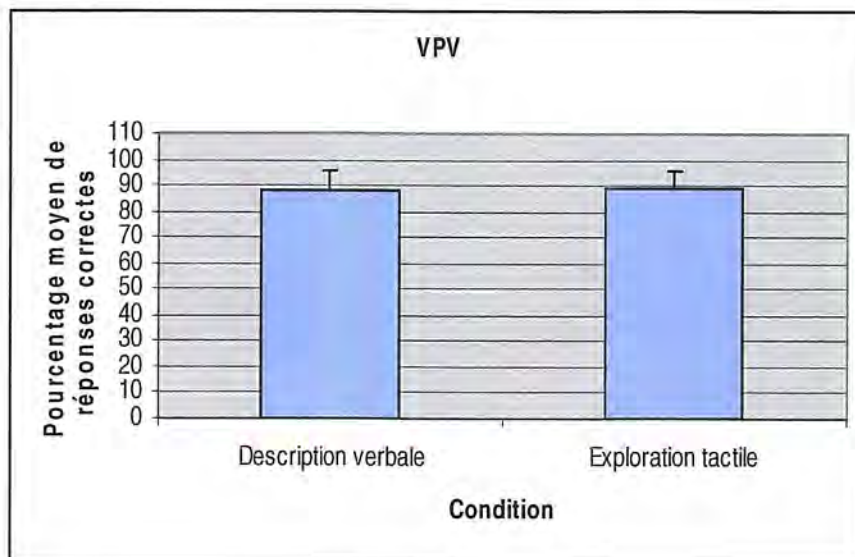


Figure 10: Pourcentage de réponses correctes obtenu par les vpv, en fonction de la modalité d'apprentissage (verbale ou tactile), et indépendamment de la différence de distances (petite, moyenne ou grande).

6.2.1.3.2. Analyse de la variable distance

Nos résultats indiquent que les participants vpv traitent différemment les petites différences de distances par comparaison avec les moyennes et les grandes différences de distances ($F_{(2,44)} = 34,870$; $p \sim 0$; Fig. 11).

En effet, le pourcentage de réponses correcte est significativement différent s'il s'agit de comparer D1 à D2 ($p < 0,0014$) ou à D3 ($p \sim 0$) et D2 à D3 ($p < 0,0003$). Ainsi, la figure 24 illustre que plus la différence entre deux distances est grande et plus le pourcentage de réponses correctes est élevé.

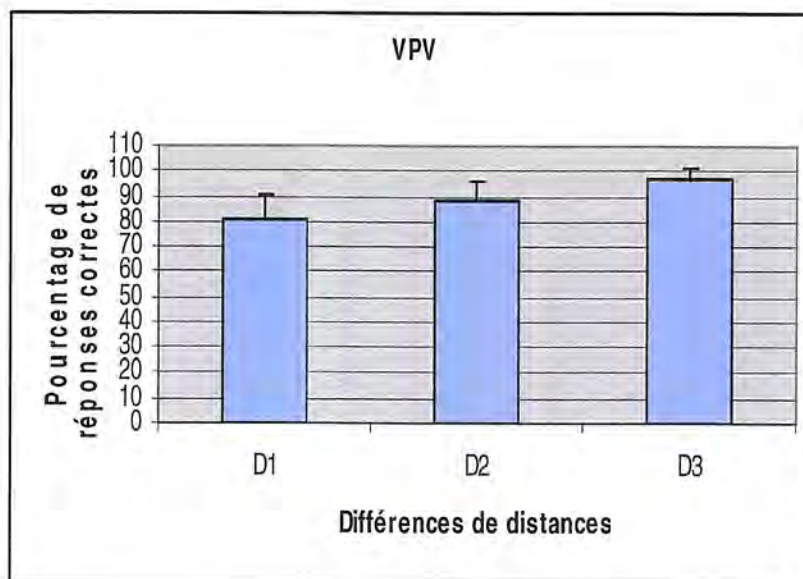


Figure 11: Pourcentage de réponses correctes obtenu par les vpv, en fonction de la différence de distances (petite, moyenne ou grande), et indépendamment de la modalité d'apprentissage (verbale ou tactile)

6.2.1.3.3. Analyse de l'interaction des variables modalités et distances

Les données montrent que le taux de réussite pour évaluer les différences entre distances ne varie pas significativement en fonction de la modalité d'acquisition de la configuration pour les participants vpv (Fig. 12).

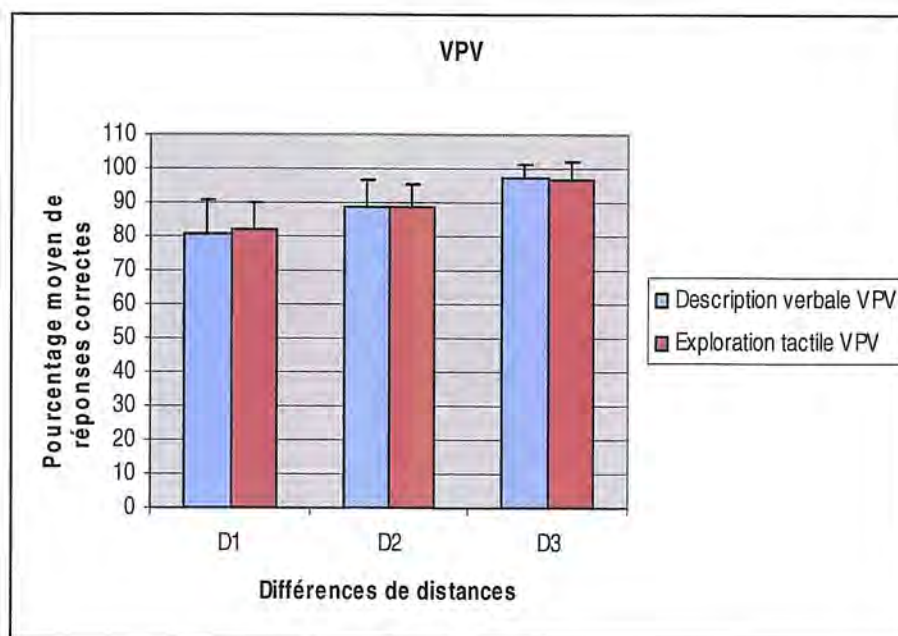


Figure 12: Pourcentage de réponses correctes obtenu par les vpv, en fonction de la différence de distances (petite, moyenne ou grande), et de la modalité d'apprentissage (verbale ou tactile).

En résumé des résultats obtenus par les participants vpv, nous observons qu'il n'y a pas d'effet facilitateur de l'une ou l'autre des modalités d'acquisition de la configuration spatiale sur les pourcentages de réponses correctes associées aux différentes distances. De plus, il apparaît clairement que pour les participants vpv les pourcentages de réponses correctes sont d'autant plus élevés que la différence entre les deux distances est grande plutôt que moyenne ou petite.

6.2.1.4. Chez les non-voyants tardifs

6.2.1.4.1. Analyse de la variable modalité d'acquisition

Nos résultats indiquent que le taux de réussite des participants ayant perdu la vue au cours de leur développement ne varie pas en fonction du mode d'apprentissage de la tâche, issu par description verbale ou exploration tactile (Fig. 13).

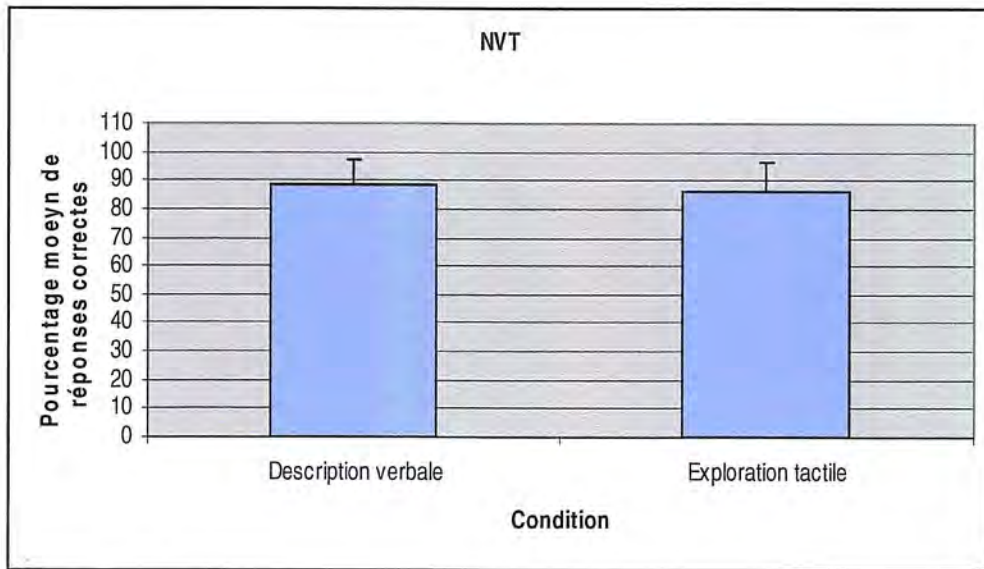


Figure 13: Pourcentage de réponses correctes obtenu par les nvt, en fonction de la modalité d'apprentissage (verbale ou tactile), et indépendamment de la différence de distances (petite, moyenne ou grande):

6.2.1.4.2. Analyse de la variable distance

Les données obtenues montrent que les participants nvt traitent différemment les petites différences de distances par comparaison avec les moyennes et les grandes ($F_{(2,44)} = 19,127$; $p \sim 0$; Fig. 14). En effet, l'analyse à posteriori indique que leurs scores sont significativement différents pour D1 et D2 ($p < 0,0056$) pour D1 et D3 ($p \sim 0$), comme pour le traitement comparé entre D2 et D3 ($p < 0,03$). Ainsi, la figure 14 illustre que plus la différence entre deux distances est grande et plus le pourcentage de réponses correctes des nvt est important.

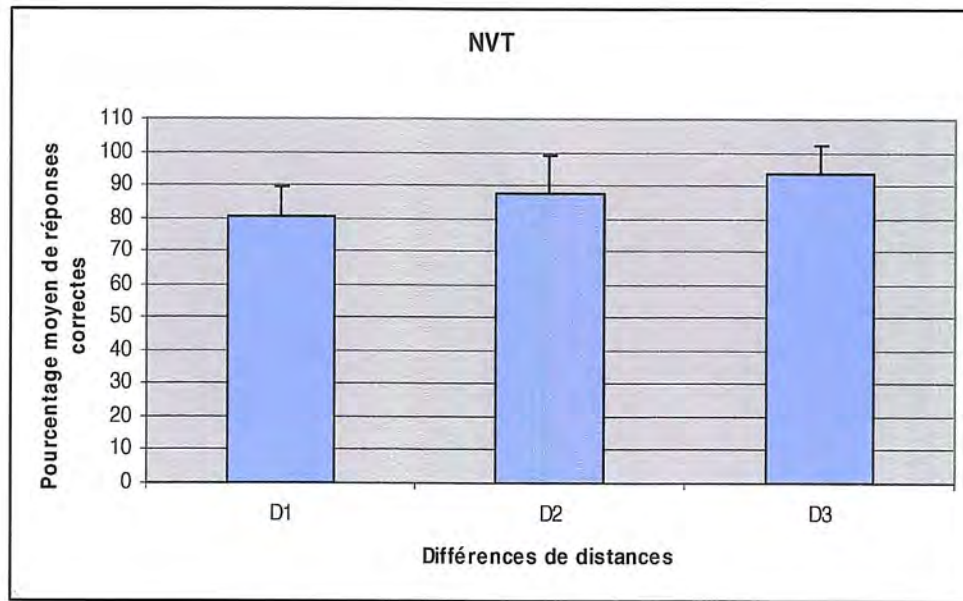


Figure 14: Pourcentage de réponses correctes obtenu par les nvt, en fonction de la différence de distances (petite, moyenne ou grande), et indépendamment de la modalité d'apprentissage (verbale ou tactile)

6.2.1.4.3. Analyse de l'interaction entre les variables modalités et distances

Les données montrent que le taux de réussite des participants nvt pour différencier des distances ne dépend pas significativement du mode d'apprentissage (par description verbale ou exploration tactile) de la configuration (Fig. 15).

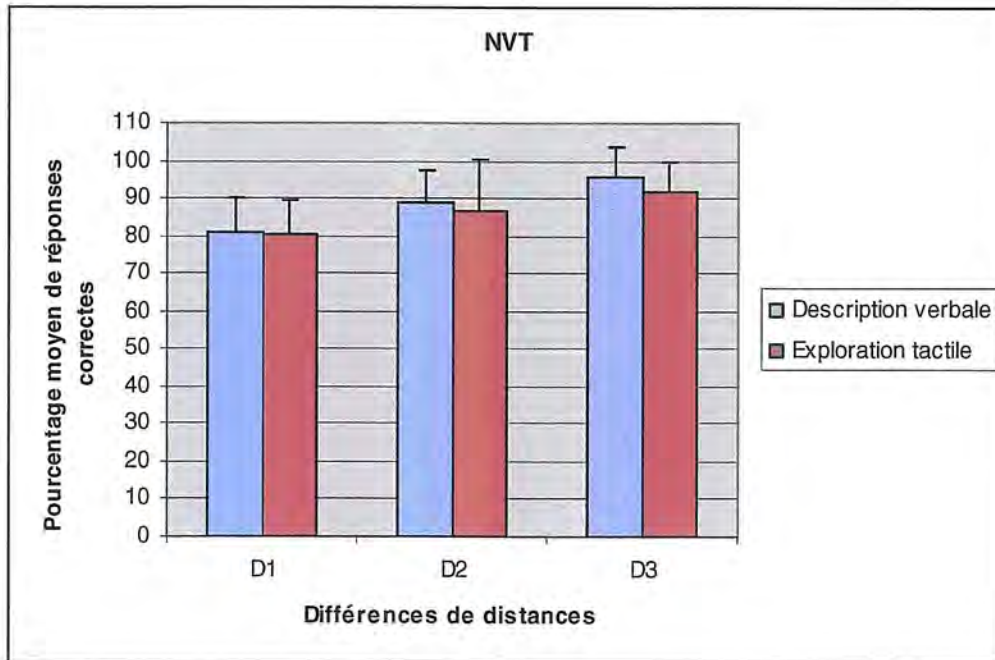


Figure 15: Pourcentage de réponses correctes obtenu par les nvt, en fonction de la différence de distances (petite, moyenne ou grande), et de la modalité d'apprentissage (verbale ou tactile).

En résumé des résultats obtenus par les participants nvt, nous montrons qu'il n'y a pas d'effet facilitateur de l'une au l'autre des modalités d'acquisition de la configuration spatiale sur leurs performance. De surcroît, les pourcentages de réponses correctes des nvt augmentent d'autant plus que la différence entre les deux distances est grande plutôt que moyenne ou petite.

6.2.1.5. Chez les participants non-voyants de naissance

6.2.1.5.1. Analyse de la variable modalité d'acquisition

Les données issues de l'analyse des performances des personnes nvn ne montrent pas de différence significative que les distances soient traitées à la suite d'un apprentissage par description verbale ou après une exploration tactile (Fig. 16).

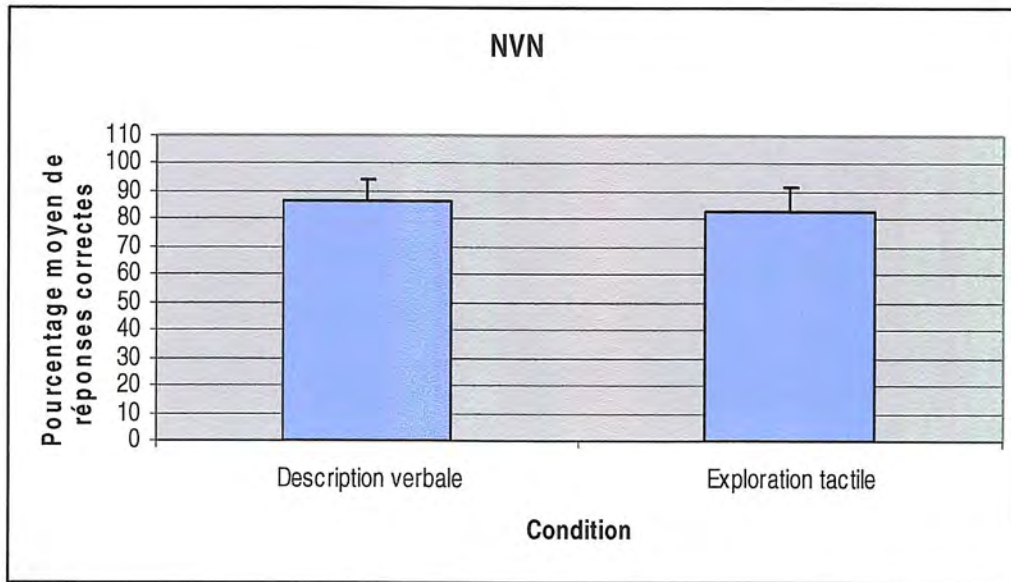


Figure 16: Pourcentage de réponses correctes obtenu par les nvn, en fonction de la modalité d'apprentissage (verbale ou tactile), et indépendamment de la différence de distances (petite, moyenne ou grande).

6.2.1.5.2. Analyse de la variable distance

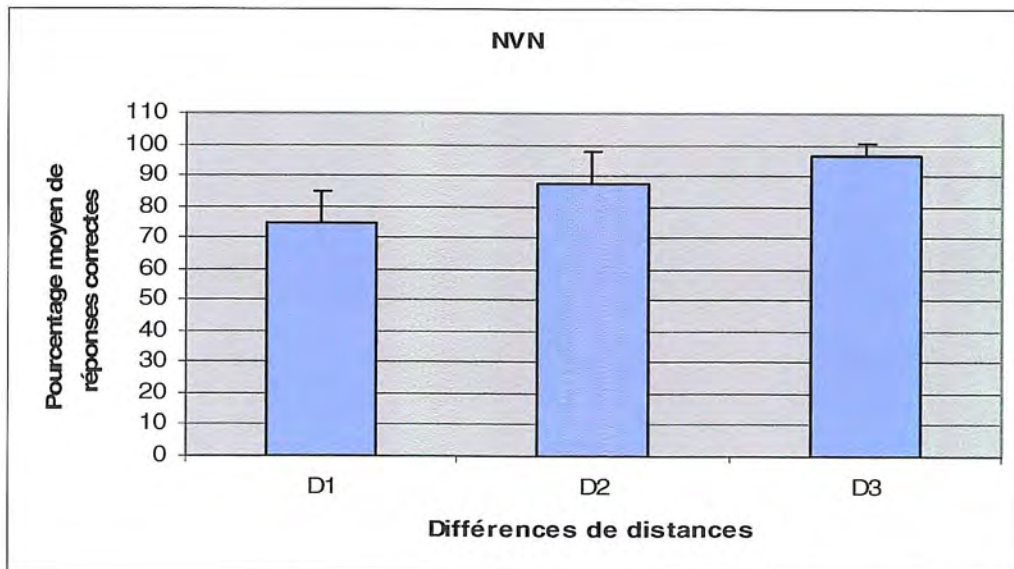


Figure 17: Pourcentage de réponses correctes obtenu par les nvn, en fonction de la différence de distances (petite, moyenne ou grande), et indépendamment de la modalité d'apprentissage (verbale ou tactile).

Les données obtenues montrent que les participants nvN traitent différemment les petites différences de distances, plutôt que les moyennes et les grandes ($F_{(2,44)} = 67,535$; $p \sim 0$; Fig. 17). Le pourcentage de réponses correctes augmente progressivement avec la distance ; de D1 à D2 ($p \sim 0$), ou D3 ($p \sim 0$), ou encore entre D2 et D3 ($p \sim 0$). Ainsi, plus la différence entre deux distances est grande et plus le pourcentage de réponses correctes pour les comparer est élevé (Fig. 17).

6.2.1.5.3. Analyse de l'interaction des variables modalités et distances

Les données ne montrent pas d'effet significatif dans le traitement des trois différences de distances en fonction de la modalité d'acquisition de la configuration pour les participants nvN (Fig. 18).

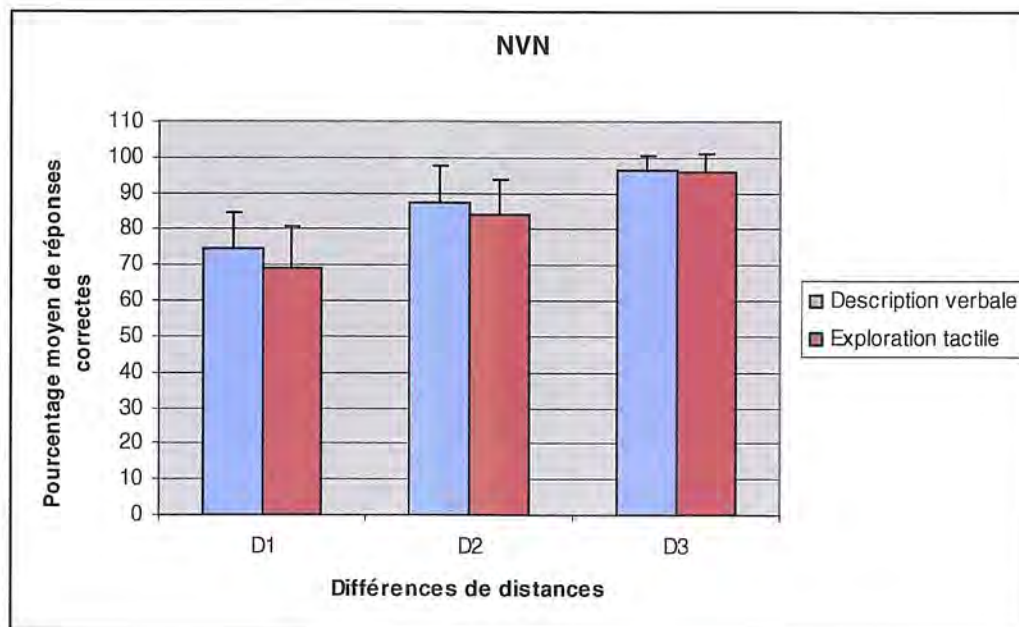


Figure 18: Pourcentage de réponses correctes obtenu par les nvN, en fonction de la différence de distances (petite, moyenne ou grande), et de la modalité d'apprentissage (verbale ou tactile).

En résumé des résultats obtenus par les participants nvN, nous montrons que l'une ou l'autre des modalités d'acquisition de la configuration spatiale n'influence pas leur capacité à comparer correctement des distances. Leur taux de réussite est d'autant plus élevé que la différence entre les deux distances est grande plutôt que moyenne ou petite.

6.2.1.7. Résumé des données issues de l'analyse des pourcentages de réponses correctes

Nos données montrent très clairement que ni la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration tactile), ni l'expérience visuelle précoce n'influencent la capacité des participants (vpv, nvt, nvn) à comparer mentalement les distances. Nous montrons que plus la différence entre deux distances est grande, et plus le pourcentage de réponses correctes est élevé pour chacun des groupes de participants.

Autrement dit, que l'apprentissage de la configuration se fasse par une description verbale ou bien par une exploration tactile, et quelle que soit l'expérience visuelle des participants, décider de quelle distance est la plus longue engendre d'autant plus d'erreurs que la différence est petite, plutôt que moyenne ou grande.

Par ailleurs, nos données montrent que dans le cas où la comparaison de distances porte sur une petite différence, les personnes dépourvues d'expérience visuelle précoce font plus d'erreurs que les personnes privées tardivement et / ou définitivement de la vue. Ceci n'est en revanche plus le cas pour les différences moyennes ou grandes entre distances.

6.2.2. Analyse des temps de réponse

Avant de commencer l'analyse, nous avons remplacé les valeurs extrêmes, au sein de chaque catégorie de différences de distances, par les temps de réponse supérieur ou inférieur de 1,5 écarts-types à la moyenne. En d'autres termes, pour une différence de distance donnée et un participant bien particulier, si un de ses temps de réponse est supérieur ou inférieur de deux 1,5 écart-type à la moyenne des temps de réponse pour cette distance, et pour ce participant, alors ce temps de réaction est éliminé. Ces valeurs extrêmes ont été remplacées par la valeur de la moyenne des temps de réponse plus 1,5 écart-types ou moins 1,5 écart-types selon qu'elles étaient supérieures ou inférieures à la moyenne.

6.2.2.1. Chez les participants voyants avec ou sans privation de vision

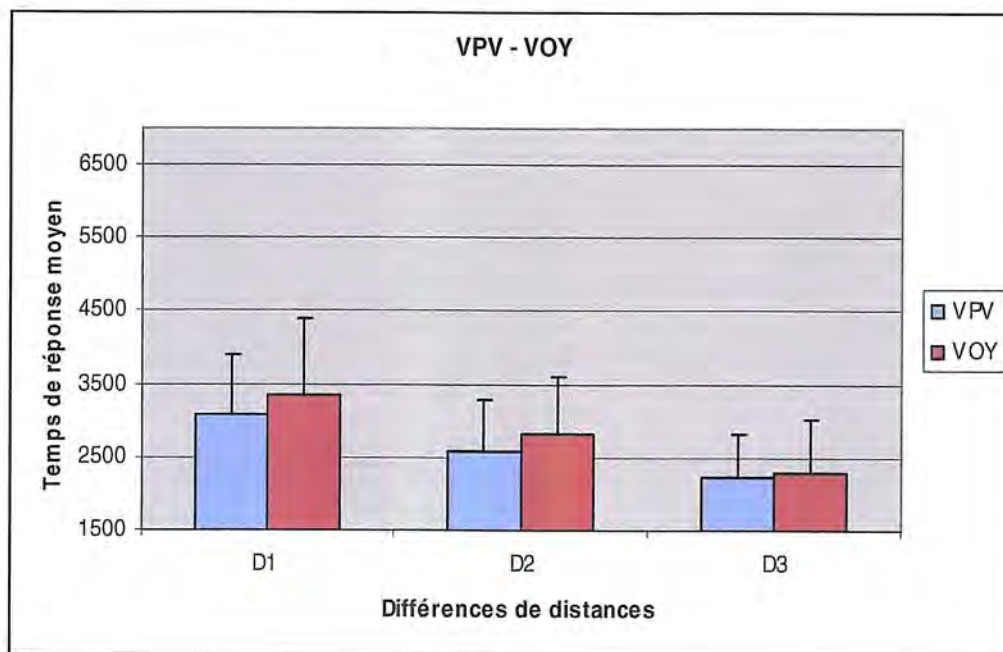


Figure 19: Temps de réponse moyen en fonction de petite (D1), moyenne (D2) ou grandes (D3) différence de distances, chez des personnes voyantes (voy) et privées artificiellement de vision (vpv) à la suite d'un apprentissage de la configuration par description verbale (*expérience 2*).

Nos résultats indiquent que les temps de réponse associés au traitement des petites, moyennes et grandes différences de distances à la suite d'une description verbale de la configuration, ne diffèrent pas entre les participants voyants, privés temporairement ou non de vision (Fig. 19).

6.2.2.2. Chez l'ensemble des participants

6.2.2.2.1. Analyse de la variable modalité d'acquisition

Nos données montrent que la modalité d'apprentissage de la configuration, par description verbale ou exploration tactile, n'a pas d'influence significative sur les temps de réponses des participants, bénéficiant ou non d'une capacité visuelle (Fig. 20).

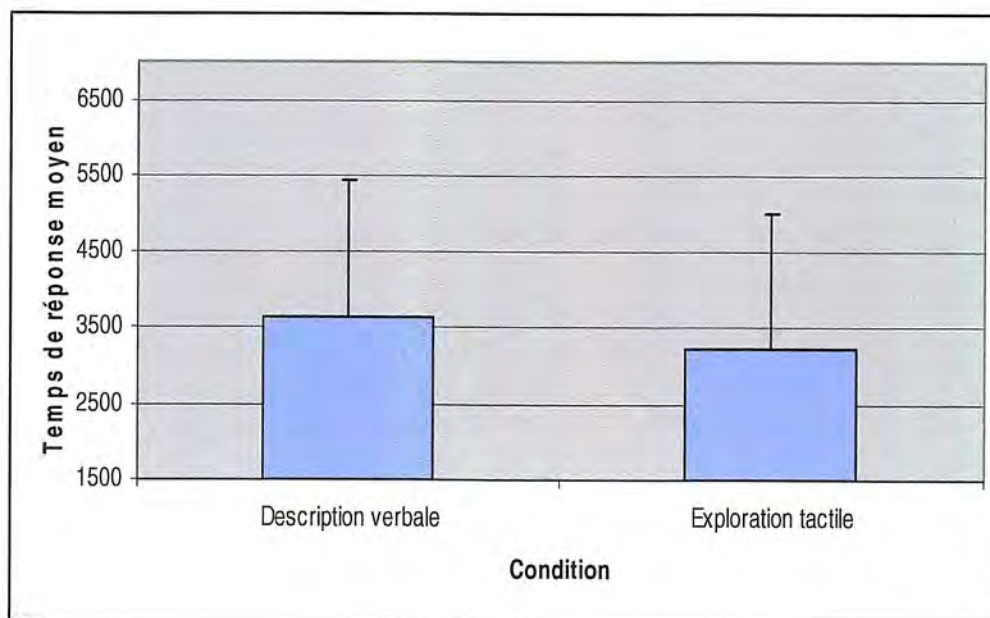


Figure 20: Temps de réponse moyen obtenu en fonction de la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration tactile), indépendamment du groupe (vpv, nvt, nvn), et de la différence de distances (petite, moyenne, grande).

6.2.2.2.2. Analyse de la variable groupe

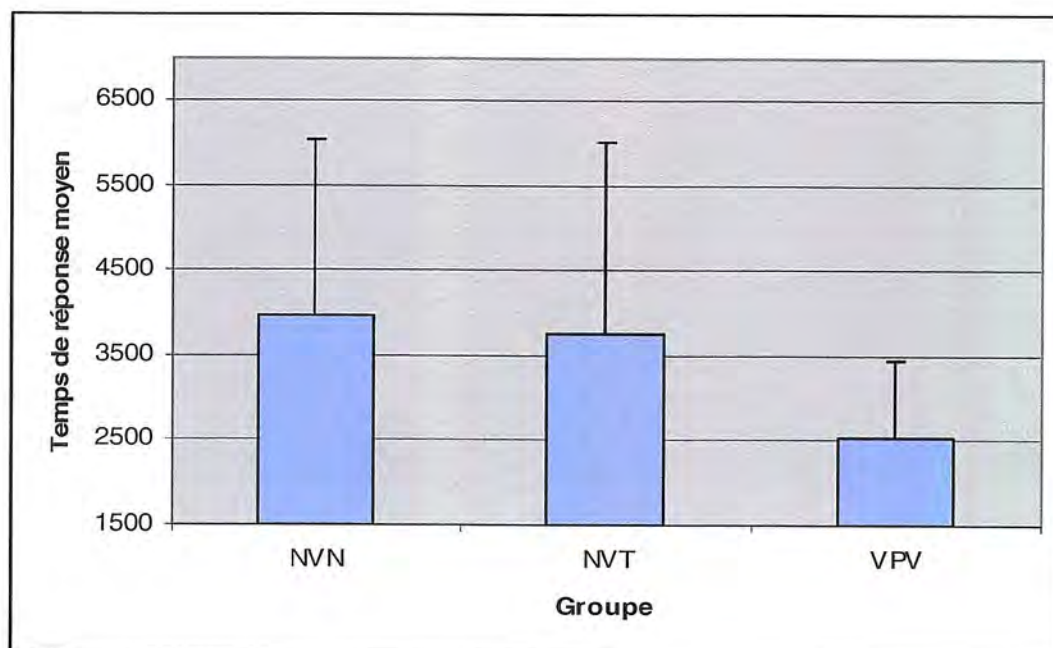


Figure 21: Temps de réponse moyen obtenu par les différents groupes (nvn, nvt, vpv), indépendamment de la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration tactile), et de la différence de distances (petite, moyenne, grande).

Nos résultats indiquent que les temps de réponses des participants diffèrent significativement selon qu'ils appartiennent au groupe des nvn, des nvt ou des vpv ($F_{(2,66)} = 5,1863$; $p < 0,008$). Une analyse post-hoc des données révèle une différence significative entre les nvn et les vpv ($p < 0,015$; Fig. 21), entre les nvt et les vpv ($p < 0,046$; Fig. 21). En revanche, il n'apparaît pas de différence significative entre les personnes non-voyantes, qu'elles le soient de naissance ou bien que la cécité soit survenue tardivement (Fig. 21).

Autrement dit, la privation visuelle définitive (qu'elle soit de naissance ou bien survenue tardivement) a significativement affecté le temps nécessaire au traitement de l'information dans le cadre d'une tâche de comparaison mentale de distances.

6.2.2.2.3 Analyse de la variable distance

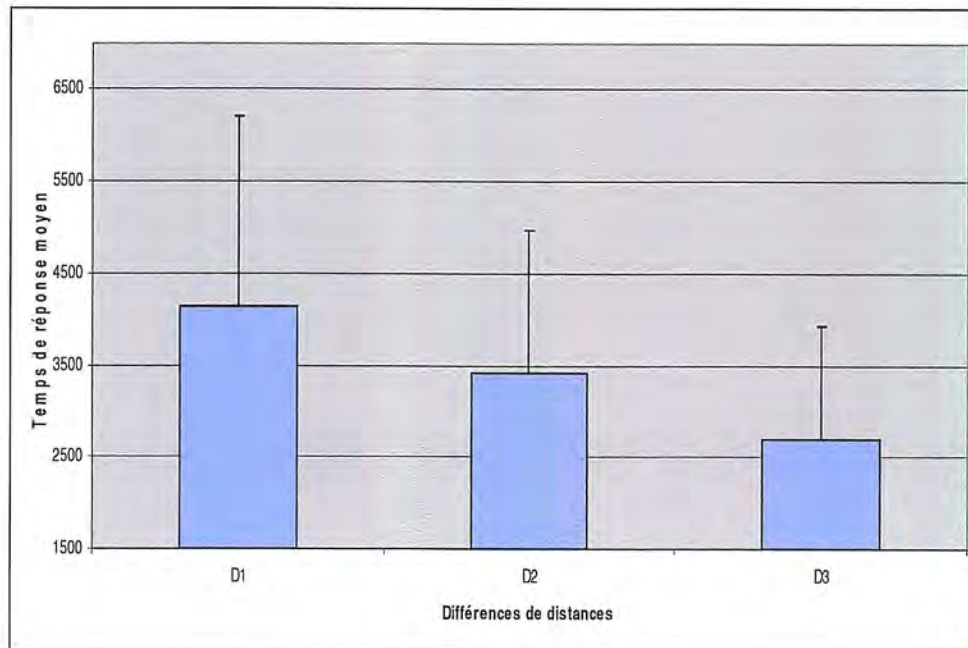


Figure 22 : Temps de réponse moyen obtenu en fonction de la différence de distances (petite, moyenne, grande), indépendamment de la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration tactile), et du groupe expérimental (nvn, nvt, vpv).

Les résultats que nous avons obtenus indiquent que le temps nécessaire à la comparaison de distances de longueur différentes diffère significativement entre les groupes de participants ($F_{(2,132)} = 51,016$; $p \sim 0$). Une analyse *a posteriori* des données montre que les petites différences de distances (D1) sont traitées différemment des moyennes (D2 ; $p \sim 0$), et des grandes (D3 ; $p \sim 0$), comme l'illustre la figure 4. De manière similaire, les moyennes et les grandes différences de distances sont elles aussi traitées de manière significativement différente par les participants (D2 et D3 ; $p \sim 0$; Fig. 22).

Ainsi, il apparaît qu'effectuer une comparaison mentale de distances lorsque la différence entre les deux distances est petite nécessite un temps de traitement plus important que lorsque la différence entre les deux distances est moyenne ou grande, et ceci, sans distinction du groupe d'appartenance des participants, ainsi que la modalité d'acquisition de la configuration (Fig. 22).

6.2.2.2.4 Analyse de l'interaction entre les variables groupe et distance

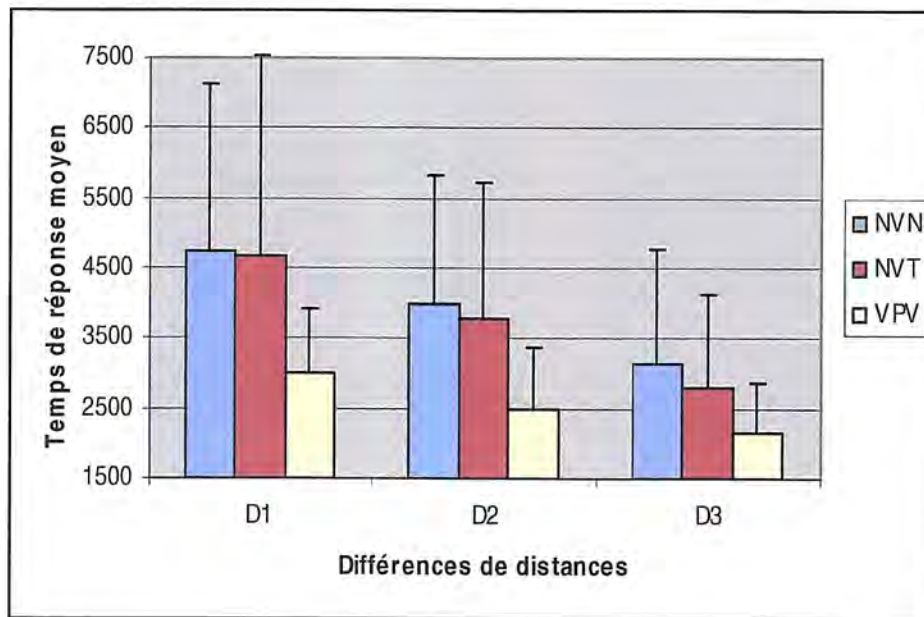


Figure 23: Temps de réponse moyen par groupe (nvn, nvt, vpv), en fonction de la différence de distances (petite, moyenne, grande), indépendamment de la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration tactile).

Les données que nous avons obtenues révèlent une différence significative de l'interaction entre les facteurs groupe et distance ($F_{(4,132)} = 2,4726$; $p < 0,048$; Fig. 23).

Les résultats indiquent clairement que les temps de réponse associés aux différences de distances dépend du groupe auquel appartiennent les participants aussi bien pour les petites différences de distances (D1 ; $F(2, 44) = 4,6132$; $p = 0,01518$), que pour les moyennes (D2 ; $F(2, 44) = 5,9417$; $p = 0,00520$). En revanche, dans le cas des grandes différences de distances (D3), aucune différence significative entre les groupes n'apparaît.

Les analyses *a posteriori*, révèlent que les petites différences de distances (D1) sont traitées de manière significativement différentes par les vpv et les nvn ($p < 0,0356$) ainsi que par les vpv et les nvt ($p < 0,0457$). En revanche, dès lors que les participants sont privés définitivement de vision (nvt et nvn), aucune différence sur les temps de traitement n'apparaît. Il en est de même pour les moyennes différences de distances (D2 ; vpv vs. nvn, $p < 0,0101$; vpv vs. nvt, $p < 0,0329$). Il n'apparaît pas de différence entre les nvt et nvn.

6.2.2.3. Chez les participants voyants privés temporairement de vision

6.2.2.3.1. Analyse de la variable modalité d'acquisition

Nos données montrent que la modalité d'apprentissage de la configuration selon une description verbale ou par une exploration tactile n'a pas d'influence significative sur les temps de réponses des participants privés temporairement de vision (Fig. 24).

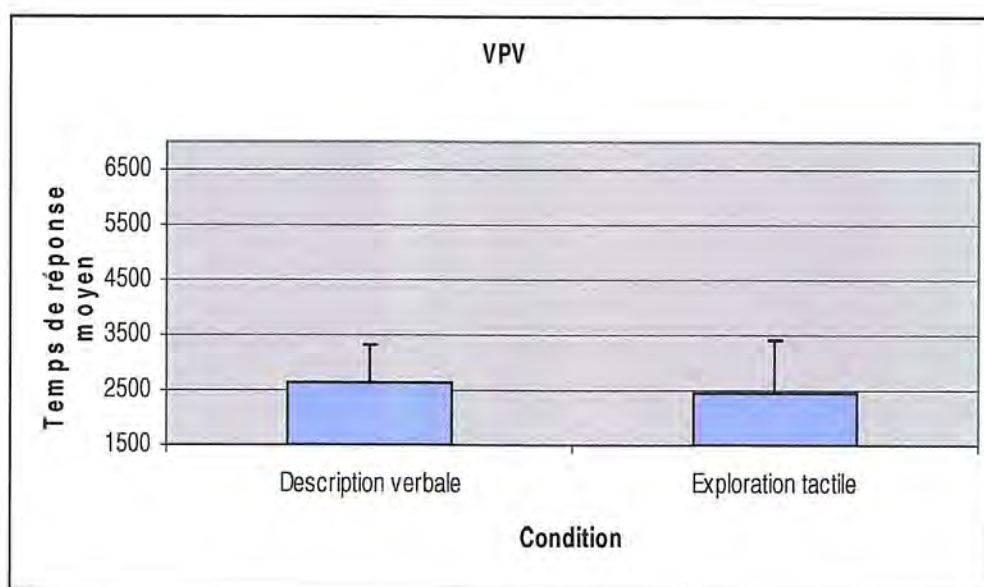


Figure 24: Temps de réponse moyen obtenu par les vpv, en fonction de la modalité d'apprentissage (verbale ou tactile), et indépendamment de la différence de distances (petite, moyenne ou grande).

6.2.2.3.2. Analyse de la variable distance

Les résultats obtenus montrent que les participants privés temporairement de la vue traitent différemment les petites différences de distances, plutôt que les moyennes et les grandes. En effet, il apparaît une différence significative pour le facteur distance ($F_{(2,44)}=29,649$; $p \sim 0$). En particulier, les temps de traitement entre D1 et D2 sont significativement différents ($p \sim 0$), comme entre D2 et D3 ($p < 0,012$), et enfin entre D1 et D3 ($p \sim 0$), comme l'illustre la figure 25.

Ainsi, pour le groupe des vpv, effectuer une comparaison mentale de distances lorsque la différence entre les deux distances est petite nécessite un temps de traitement plus

important que lorsque la différence entre les deux distances est moyenne ou grande, et ceci, que la configuration ait été apprise suite à une description verbale ou bien une exploration tactile.

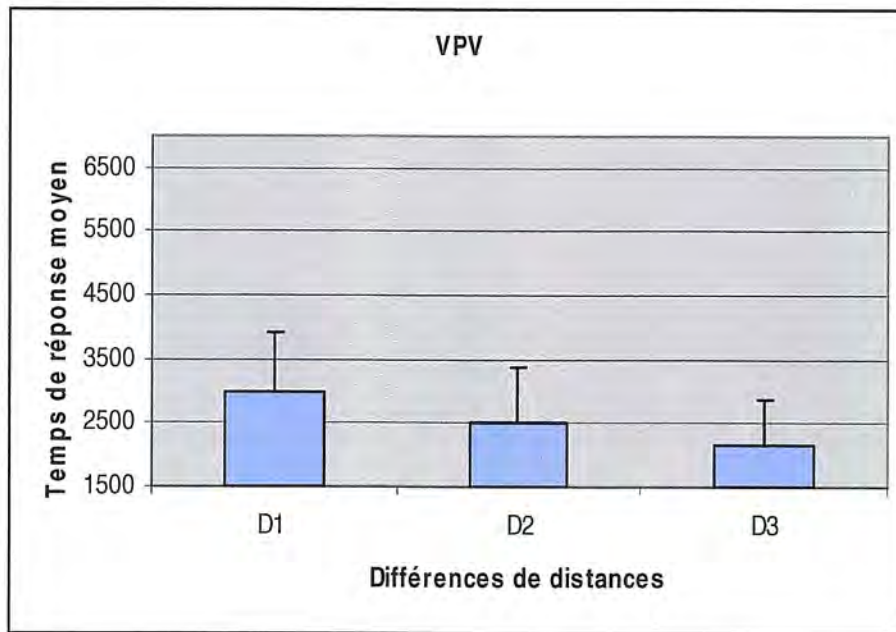


Figure 25: Temps de réponse moyen obtenu par les vpv, en fonction de la différence de distances (petite, moyenne ou grande), et indépendamment de la modalité d'apprentissage (verbale ou tactile).

6.2.2.3.3. Analyse de l'interaction des variables modalités et distances

Les données obtenues par le groupe des participants vpv ne montrent pas d'effet significatif de l'interaction entre la modalité d'apprentissage et le temps nécessaire au traitement des trois types de distances à comparer (Fig. 26). Autrement dit, la modalité d'acquisition n'a pas d'influence sur le temps nécessaire pour comparer des distances différentes (Fig. 26).

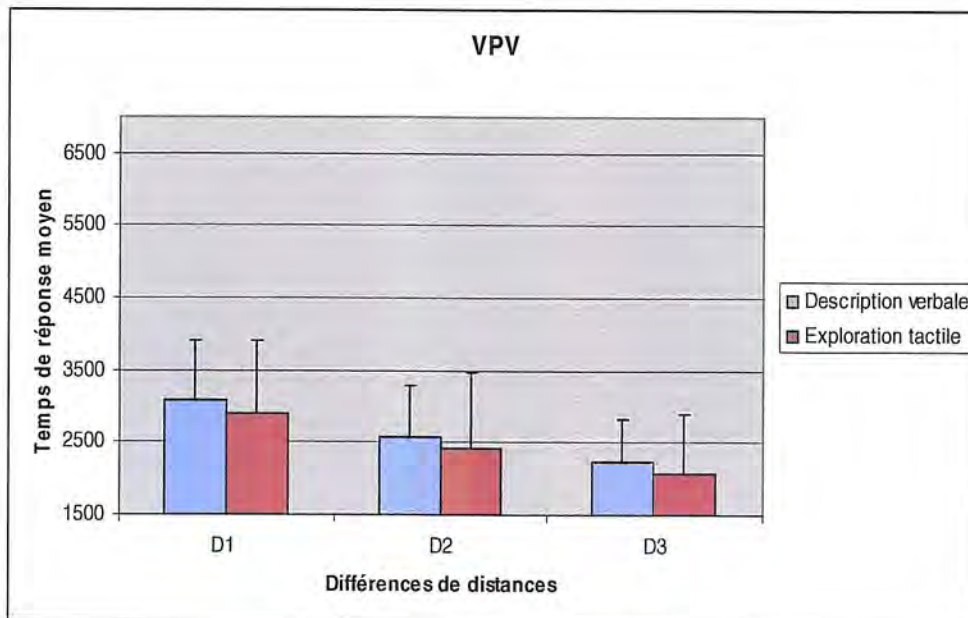


Figure 26: Temps de réponse moyen obtenu par les vpv, en fonction de la différence de distances (petite, moyenne ou grande), et de la modalité d'apprentissage (verbale ou tactile).

En résumé des résultats obtenus chez les participants vpv, nous montrons que la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration tactile), n'influe pas sur les temps de réponse associés aux différences de distances (D1, D2, D3). Par ailleurs, les données montrent que le temps nécessaire pour comparer deux distances sera d'autant plus long que la différence entre les deux distances sera petite, plutôt que moyenne ou grande.

6.2.2.4. Chez les participants non-voyants tardifs

6.2.2.4.1. Analyse de la variable modalité d'acquisition

Le temps de réponse des participants nvt ne diffère pas significativement selon que l'apprentissage de la tâche se soit effectué après une description verbale ou une exploration tactile (Fig. 27).

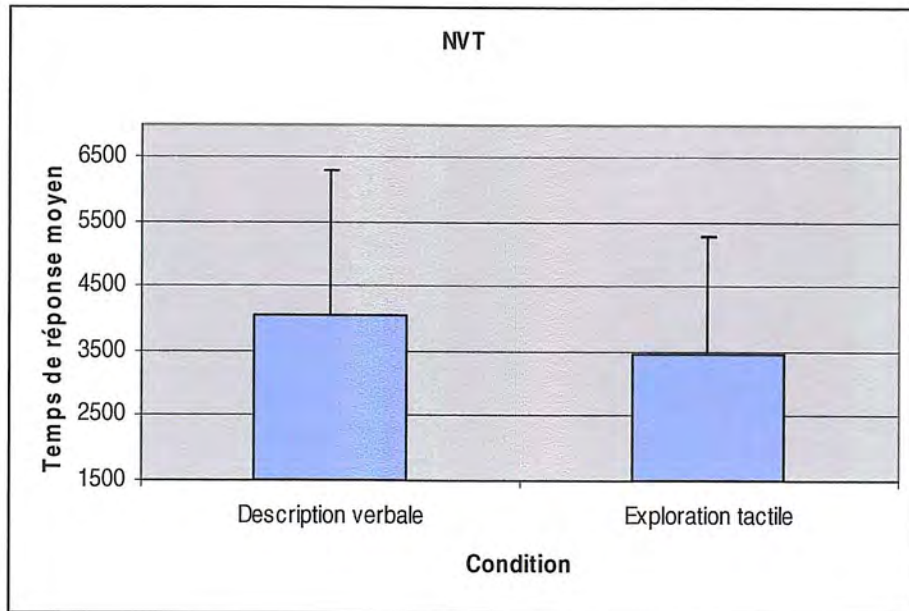


Figure 27 : Temps de réponse moyen obtenu par les nvt, en fonction de la modalité d'apprentissage (verbale ou tactile), et indépendamment de la différence de distances (petite, moyenne ou grande).

6.2.2.4.2. Analyse de la variable distance

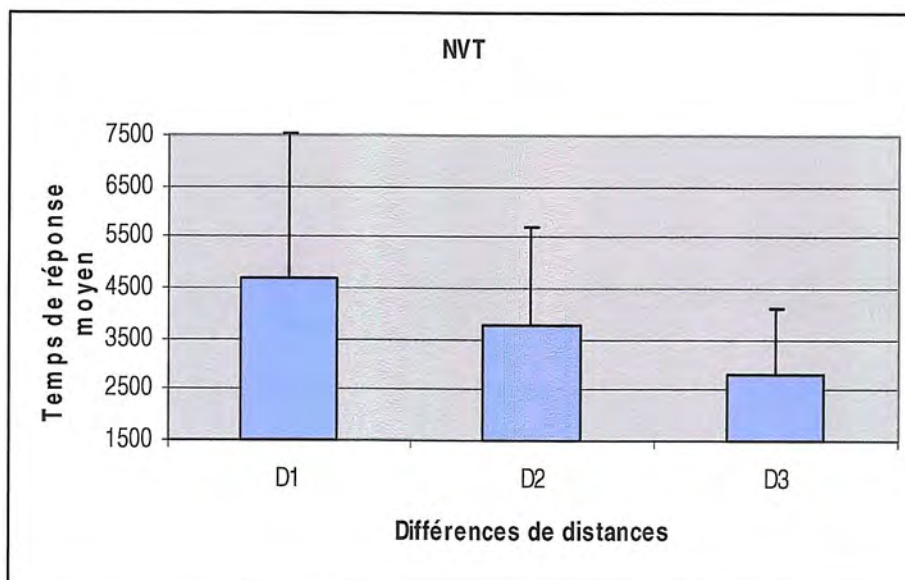


Figure 28 : Temps de réponse moyen obtenu par les nvt, en fonction de la différence de distances (petite, moyenne ou grande), et indépendamment de la modalité d'apprentissage (verbale ou tactile).

Les données obtenues montrent que les participants dont la cécité est survenue tardivement au cours de leur développement traitent différemment les petites différences de distances par comparaison avec les moyennes et les grandes.

En effet, il apparaît une différence significative pour traiter les distances ($F_{(2,44)} = 14,860 ; p \sim 0$), avec une différence significative entre D1 et D2 ($p < 0,042$), ou D3 ($p \sim 0$) et, entre D2 et D3 ($p < 0,024$), comme l'indique la figure 28. Ainsi, plus la différence entre deux distances sera importante, et moins le temps nécessaire pour décider quelle est la distance la plus grande sera long.

6.2.2.4.3. Analyse de l'interaction des variables modalités et distances

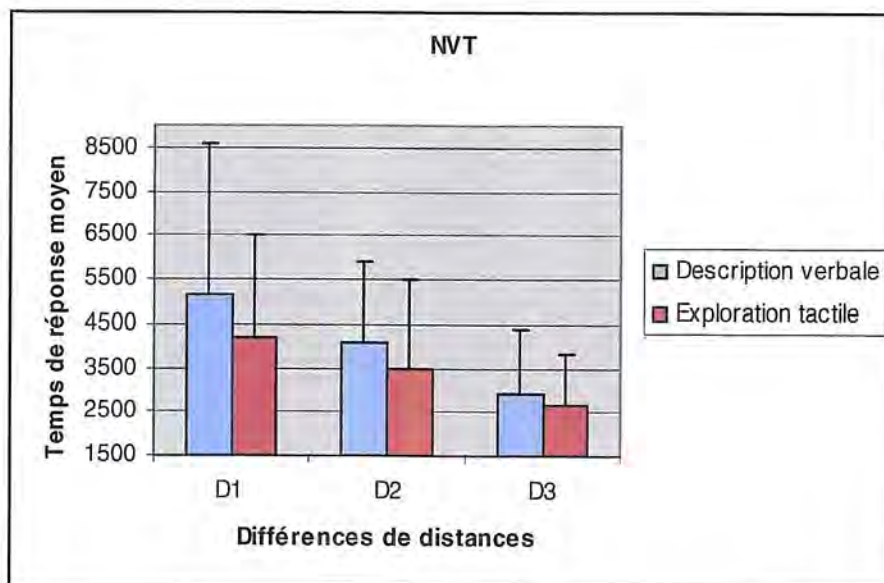


Figure 29: Temps de réponse moyen obtenu par les nvt, en fonction de la différence de distances (petite, moyenne ou grande), et de la modalité d'apprentissage (verbale ou tactile).

Les données ne montrent pas d'effet significatif dans le traitement des trois différences de distances en fonction de la modalité d'acquisition de la configuration pour les participants nvt.

En résumé des résultats obtenus par les participants nvt nous montrons que la modalité d'apprentissage de la configuration n'influe pas de façon significative sur les temps de réponse et, que le temps nécessaire pour comparer deux distances est d'autant plus long que la différence entre les deux distances est petite, plutôt que moyenne ou grande.

6.2.2.5. Chez les participants non-voyants de naissance

Comme nous pouvions nous y attendre du fait de l'analyse statistique globale (cf. sections précédentes : 2.1.2.2 et 2.1.2.4), les analyses des données obtenues par les participants non-voyants de naissance confirment que leur capacité à comparer des distances est similaire à celles des individus privés de vision ultérieurement lors de leur développement.

6.2.2.5.1. Analyse de la variable modalité d'acquisition

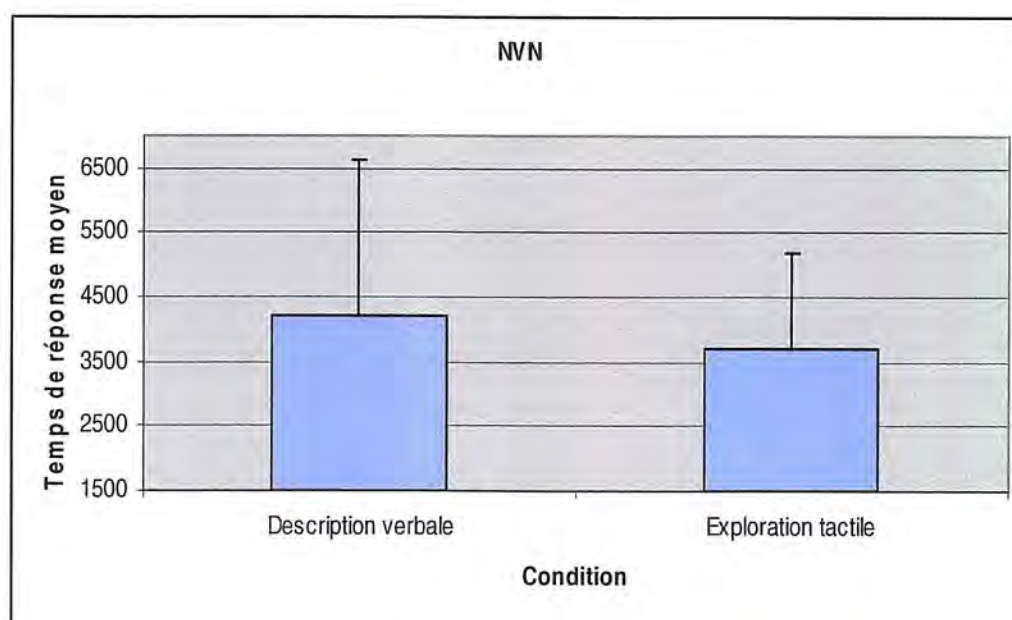


Figure 30: Temps de réponse moyen obtenu par les nvn, en fonction de la modalité d'apprentissage (verbale ou tactile), et indépendamment de la différence de distances (petite, moyenne ou grande).

Le temps nécessaire aux participants nvn pour répondre ne diffère pas significativement entre les deux conditions d'apprentissage de la configuration, description verbale ou exploration tactile (Fig. 30).

6.2.2.5.2. Analyse de la variable distance

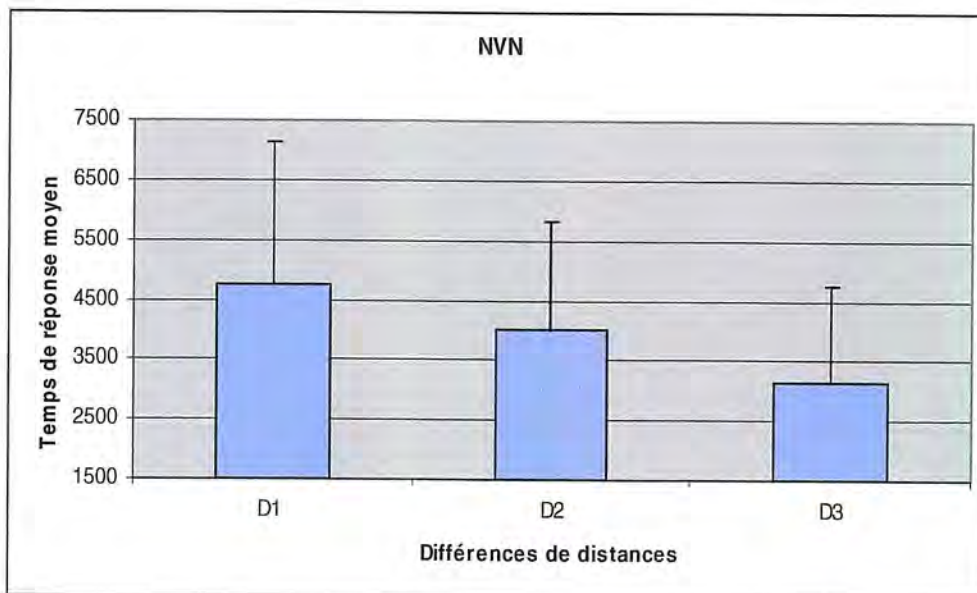


Figure 31: Temps de réponse moyen obtenu par les nvN, en fonction de la différence de distances (petite, moyenne ou grande), et indépendamment de la modalité d'apprentissage (verbale ou tactile).

Les données montrent que les participants nvN traitent différemment les petites différences de distances, plutôt que les moyennes et les grandes. En effet, il apparaît une différence significative dans la comparaison des distances entre elles ($F_{(2,44)} = 24,814$; $p \sim 0$), avec une différence significative entre D1 et D2 ($p < 0,008$) ou D3 ($p \sim 0$), et entre D2 et D3 ($p < 0,002$). Ces résultats sont illustrés par la figure 31. Ainsi, plus une différence entre deux distances sera grande, et moins le temps nécessaire pour décider quelle est la distance la plus grande sera long.

6.2.2.5.3. Analyse de l'interaction des variables modalités et distances

Les données obtenues avec les participants nvN ne montrent pas d'effet significatif dans le traitement des trois types de distances en fonction de la modalité d'acquisition de la configuration (Fig. 32).

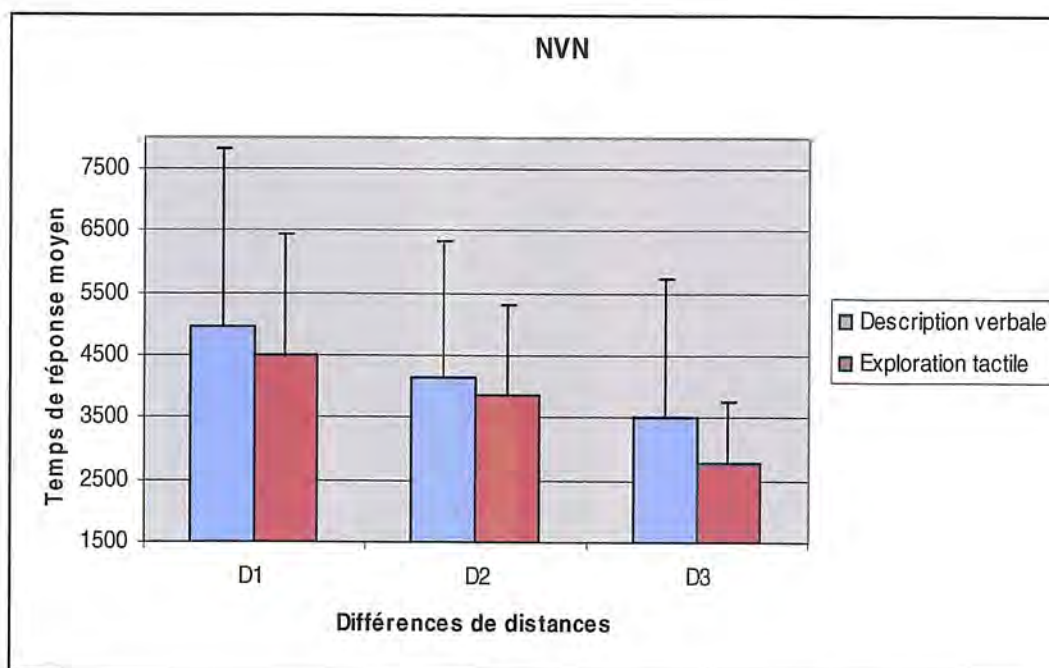


Figure 32: Temps de réponse moyen obtenu par les nvv, en fonction de la différence de distances (petite, moyenne ou grande), et de la modalité d'apprentissage (verbale ou tactile).

En résumé les résultats obtenus par les participants nvv, indiquent très clairement que la modalité d'apprentissage de la configuration spatiale à mémoriser, qu'il s'agisse d'une description verbale ou bien d'une exploration tactile, n'influe pas significativement sur les temps de réponses. Par ailleurs, les résultats montrent que le temps nécessaire pour comparer deux distances est d'autant plus long que la différence entre les deux distances est petite, plutôt que moyenne ou grande.

6.2.2.7. Résumé des données issues des temps de réponse

Nous avons pu mettre en évidence que quel que soit le degré de privation visuelle, les participants mettaient d'autant plus de temps à décider quelle distance, entre deux, était la plus longue dès lors que la différence entre les deux distances était petite, plutôt que moyenne et enfin grande.

Par ailleurs, alors qu'aucune différence significative n'apparaît entre les non-voyants de naissance et les non-voyants tardifs, ceux-ci se distinguent ensemble des voyants privés de vision. En effet, les participants souffrant de cécité ont besoin d'un temps de traitement

significativement plus important pour résoudre la même tâche expérimentale, en comparaison de sujets voyants privés artificiellement de vision. Notons par ailleurs qu'au sein de cette population la variabilité interindividuelle apparaît être relativement forte.

En revanche, même si cela engendre un temps de réponse plus long, la privation permanente du sens visuel ne modifie pas la capacité de comparer des distances: comme chez les sujets voyants (vpv), les petites différences de distances nécessitent toujours un temps de traitement plus important que les moyennes et enfin, les grandes différences.

Nos données montrent aussi que dans le cas où la comparaison concerne une petite ou une moyenne différence de distances, les personnes vpv mettent moins de temps que les personnes privées définitivement de leur sens visuel (nvt, nvn) pour décider quelle distance entre deux est la plus longue. En revanche, dès qu'il s'agit d'une grande différence de distance, l'expérience visuelle de l'individu n'a plus d'influence sur les temps de réponses.

6.2.3. Conclusion de l'expérience 2

En résumé, nos données montrent que plus la différence entre deux distances est grande, plus le pourcentage de réponses correctes est élevé et moins le temps de réponse est long pour comparer mentalement des distances. Par ailleurs, la modalité d'acquisition de la configuration, description verbale et exploration tactile n'influe ni sur les pourcentages de réponses correctes, ni sur les temps de réponse. Enfin, en ce qui concerne l'effet de la privation visuelle, nos données montrent que les pourcentages de réponses correctes pour les trois groupes sont similaires, alors que les non-voyants (de naissance et tardifs) ont besoin d'un temps significativement plus long que les personnes voyantes privées temporairement de leur vision pour résoudre la tâche de comparaison mentale de distances. Par ailleurs, nos données montrent que les petites et moyennes différences de distances sont traitées plus rapidement par les participants voyants privés temporairement de vision que les personnes privées définitivement de la vue, aussi bien de naissance d'une part que tardivement d'autre part. En revanche, dès que la différence entre les deux distances est grande, l'effet de l'expérience visuelle n'a plus d'influence sur les temps de réponses. Nos données montrent également que l'évaluation de distances, dès lors que la différence entre les deux est petite, engendre plus d'erreurs chez les personnes dépourvues d'expérience visuelle que chez les personnes nvt et vpv.

6.3. Discussion

Les données issues de la tâche de comparaison mentale de distances répliquent les résultats classiques obtenus par Denis et Zimmer, en 1992. Tout comme pour notre *expérience 1*, nous avons tout d'abord comparé à la littérature les données obtenues par le groupe des personnes voyantes (privées temporairement de vision, et gardant les yeux ouverts) afin de nous assurer de la validité de notre protocole expérimental (Tableau 1).

	Groupe / Distances	Petites (D1)	Moyennes (D2)	Grandes (D3)
Pourcentage de réponses correctes	Voyants les yeux ouverts (voy)	79 %	91 %	96 %
Pourcentage de réponses correctes	Voyants privés de vision (vpv)	80 %	88 %	97 %
Pourcentage de réponses correctes	Denis & Zimmer (1992)	80%	88 %	94 %

Temps de réponse	Voyants les yeux ouverts (voy)	3.351	2.811	2.301
Temps de réponse	Voyants privés de vision (vpv)	3.084	2.585	2.225
Temps de réponse	Denis & Zimmer (1992)	3.038	2.581	2.120

Tableau 1: Fréquences moyennes des temps de réponses et des pourcentages de réponses correctes obtenues dans la tâche de comparaison mentale de distances, en fonction de l'ampleur de la différence de distances, et des participants [voyants les yeux ouverts, voyants privés de vision (notre étude), participants de l'étude de Denis & Zimmer (1992)].

Les résultats que nous avons obtenus sont similaires et suivent le même type d'évolution entre les différentes différences de distances. Plus la différence entre deux distances est petite, et plus le temps de réponse des participants est important. Ces données se retrouvent aussi bien dans nos groupes voy et vpv, que chez les participants de l'expérimentation de Denis & Zimmer (1992). Nous pouvons donc considérer que notre protocole expérimental est valide.

Dans cette *expérience 2*, nous avons manipulé trois variables.

La première concernait la modalité d'acquisition de la configuration, soit par description verbale, soit par exploration tactile. Les données que nous avons obtenues, en terme de pourcentages de réponses correctes et de temps de réponses ne montrent aucun avantage de l'une ou l'autre de ces modalités pour aucun groupe de participants. Ceci suggère que l'information linguistique ou l'information provenant du sens tactile est équivalente, pour des personnes dépourvues ou non d'une expérience visuelle précoce, dès lors qu'il s'agit de comparer mentalement des distances sur une configuration ne dépassant pas 50 cm.

La deuxième variable que nous avons testée concernait l'ampleur de la différence entre les distances à évaluer. Cette dernière était soit "petite", soit "moyenne", soit "grande". Les données que nous avons obtenues ici sont en accord avec les expérimentations princeps desquelles nous nous sommes inspirés pour mettre en place nos expérimentations (voir tableau 1 ci-dessus). Ainsi, nous avons retrouvé que plus la différence entre deux distances était petite et plus le pourcentage de réponses correctes diminuait et parallèlement, que plus le temps pour décider quelle est la plus grande de deux distances était long. Cette tendance s'inverse pour les grandes différences de distances. En effet, dans ce cas là, pourcentage de réponses correctes augmente alors que les temps de réponses diminuent. Indépendamment du groupe auquel appartiennent les participants, et la modalité d'apprentissage de la configuration, le pourcentage de réponses correctes est croissant depuis les petites différences de distances jusqu'aux grandes, 78% de réponses correctes pour les petites différences de distances (la moyenne des temps de réponse de 4138 ms), 87% pour les différences de distances moyennes (3425 ms), et enfin 96% de réponses correctes pour les grandes différences (2695 ms). Nos données montrent que les différences de distances sont traitées de manière significativement différentes selon qu'elles sont petites, moyennes ou grandes (dans le cadre d'une configuration de petite taille). Ainsi, quelle que soit la modalité d'acquisition de la configuration et l'expérience visuelle précoce dont a pu bénéficier ou non le participant, les

petites différences de distances engendrent un pourcentage de réponse correctes plus faible, associé à des temps de réponse plus longs que les moyennes puis les grandes différences de distances. Par ailleurs, nos données indiquent clairement aussi que dans le cas des petites différences de distances, les personnes non-voyantes de naissance font significativement plus d'erreur que les autres populations expérimentales. Ces résultats suggèrent que la privation d'expérience visuelle précoce affecte significativement la capacité à juger des petites différences entre deux distances, et ceci dans le cadre d'une configuration spatiale de petite taille.

Enfin, la troisième variable que nous avons étudiée est celle de la privation visuelle et son effet sur la capacité à comparer mentalement des distances. Les données que nous avons obtenues nous ont permis de mettre en évidence que quel que soit le degré de privation visuelle des participants, de naissance, tardif ou bien temporaire (avec le bandeau sur les yeux pour les voyants), tous étaient capables de se représenter mentalement la configuration qu'ils avaient appris et d'en extraire des relations métriques entre les objets. En effet, les forts taux de réussite dans la tâche de comparaison mentale de distance vont de 78 % de réponses correctes à 96 %. Ces résultats suggèrent que l'expérience visuelle n'influe pas sur cette capacité à juger correctement la différence entre deux distances, et plus avant, qu'elle n'influe ni sur la conservation de l'organisation topologique de la configuration, ni sur la capacité des participants à inférer, à partir de ce dernier, des relations métriques qui unissent les différents détails entre eux.

Cette expérimentation nous a permis de mettre en évidence une équivalence des données entre nos différents groupes expérimentaux en ce qui concerne la fidélité de la configuration mentale par rapport à la configuration réelle dont elle était issue, et ceci, indépendamment de la modalité d'apprentissage. En revanche, nos données montrent clairement aussi que la privation visuelle a une influence sur le traitement de cette information spatiale qui se traduit par une augmentation des temps de réponse des participants non-voyants par comparaison avec des personnes voyantes.

Ces données suggèrent que pour parvenir à résoudre ces tâches expérimentales, les personnes non-voyantes ont recours à des stratégies plus coûteuses en temps que celles des personnes voyantes. En effet, cette expérience, bien qu'ayant été adaptée afin d'être proposée à des personnes non-voyantes, a été à l'origine élaborée pour des personnes voyantes (i.e. Denis et Zimmer, 1992). La consigne stipulait de "se créer une représentation mentale de la

configuration la plus claire et détaillée possible", suggérant le recours à une représentation de type image mentale, ce qui était de nature à avantager les personnes voyantes.

Ensuite, alors que nous aurions pu nous attendre à une certaine influence de la modalité d'acquisition de la configuration, i.e. de meilleures performances dans le cas de l'exploration tactile au bénéfice des personnes non-voyantes en comparaison aux voyantes, rien de tel n'est apparu dans nos résultats.

Nous nous sommes alors demandé dans quelle mesure les modalités que nous avons employées pour faire apprendre la configuration n'étaient pas assez distinctes l'une de l'autre pour faire émerger l'une ou l'autre comme préférentielle selon le groupe de participants. Nous avons donc décidé de proposer une expérimentation où les conditions d'apprentissage seraient drastiquement différentes, et par ailleurs, où la configuration même de l'environnement serait différente, en l'occurrence un espace de déplacement permettant l'immersion complète du participants au sein de cet environnement.

6.4. Bilan de l'expérience 1 d'exploration mentale de distances, et de l'expérience 2 de comparaison mentale de distances.

	vpv	nvt	nvN
Effet classique sur les différences de distances petite /moyenne/grande	Temps de réponse augmente		
	Pourcentage de réponses correctes diminue		
	Temps de réponse significativement plus long pour les non-voyants que les voyants		
Remarque générale	Organisation topologique conservée		
	Préservation des relations métriques entre les différents détails de la configuration		
	Pas d'effet de la modalité d'acquisition		
Remarque particulière	Corrélation temps / distances positive dans les deux conditions d'apprentissage		Pas de corrélation temps / distances dans aucune des deux conditions d'apprentissage
			Pourcentage d'erreur significativement plus important pour les petites différences de distances

Tableau 2: Récapitulatif des principaux résultats des expériences 1 et 2.

Grâce à ces expérimentations, il est bien établi que les participants dépourvus de leur sens visuel (aussi bien par privation visuelle précoce que tardive), bien que montrant des temps de réponse significativement plus longs que les personnes voyantes, peuvent se représenter mentalement une configuration de petite taille (de l'ordre de 50cm) en conservant son organisation topologique, et en inférer les relations métriques unissant les éléments de cette configuration. Nous avons par ailleurs mis en évidence que la modalité grâce à laquelle la configuration venait à la connaissance des participants n'avait pas d'influence significative sur les participants non-voyants, qu'il s'agisse de la modalité verbale que de la modalité tactile. Grâce à l'*expérience 1* d'exploration mentale de distances, nous avons pu aussi mettre en évidence qu'effectuer des parcours mentaux en ligne droite entre différents éléments d'une petite configuration mémorisée était problématique pour les personnes dépourvues de toute expérience visuelle. Aucune corrélation entre la distance à parcourir et le temps de l'exploration n'a pu être mis en évidence pour cette population. La plupart des personnes non-voyantes de naissance ayant participé à cette *expérience 1* ont rapporté ne pas comprendre l'intérêt de cette tâche expérimentale, et même avoir tout simplement une difficulté à imaginer "une ligne droite" dans une telle configuration. De la même manière, ces personnes non-voyantes (de naissance et tardives cette fois) ont dit avoir eu recours à la "visualisation" de leur cadran (tactile) de montre pour résoudre la tâche (et ceci, indépendamment de leur condition d'apprentissage). En effet, cela ne leur avait été possible qu'en "imaginant un doigt qui se déplaçait entre les différents détails" sur un cercle de la taille du cadran de leur montre.

Au regard de ces observations, nous avons souhaité soumettre nos participants à des tâches expérimentales issues cette fois de l'apprentissage d'un environnement de taille réelle. En effet, il nous a semblé pertinent de nous intéresser à cette variable, et de pouvoir observer si la difficulté éprouvée par les participants non-voyants n'était pas plutôt relative au traitement de l'information sur de petits espaces. Par ailleurs, nous souhaitions dans cette perspective, permettre aux participants de se créer la représentation d'un environnement grâce à leur exploration physique de la configuration. Nous pouvions ainsi permettre aux personnes non-voyantes (et voyantes) d'appréhender la configuration en se déplaçant d'un point à un autre, et ainsi mémoriser la configuration par leur propre appropriation de l'espace. Nous aurions aussi la possibilité de tester à nouveau les performances obtenues notamment par les participants non-voyants de naissance dans la comparaison de distances et vérifier, si dans le cadre d'une configuration de grande taille, cette comparaison serait affectée à quelques degrés.

Chapitre 7

Apport de la Réalité Virtuelle dans l'étude du comportement humain.

7.1. La Réalité Virtuelle

Depuis quelques années, la recherche scientifique bénéficie d'une nouvelle technologie : la réalité virtuelle (RV). Cette technique permet aux individus d'interagir de la façon aussi naturelle que possible avec des données rendues disponibles à leurs organes sensoriels, visuel dans la majorité des cas, mais aussi auditif et kinesthésique (Lambrey et Berthoz, 2003 ; Loomis, Klatzky, et Golledge, 1999). L'individu peut se trouver alors placé au coeur du dispositif et immergé dans une scène virtuelle. Il est équipé de capteurs permettant de déterminer en temps réel la position de son corps dans l'espace, et, selon les outils utilisés, différents segments de son corps peuvent être captés.

Ces techniques sont devenues des outils des plus précieux pour permettre d'appréhender le comportement humain, notamment de personnes présentant des troubles spécifiques, comme l'agoraphobie par exemple (Viaud-Delmon, Sarlat & Warusfel, 2004 ; Viaud-Delmon, Seguelas, Rio, Jouvent & Warusfel, 2004 ; Viaud-Delmon, Warusfel, Seguelas, Rio & Jouvent, 2005) ou la privation visuelle (Loomis, 1985, Afonso, Katz, Blum, Jacquemin & Denis, 2005).

L'intérêt majeur de la réalité virtuelle est de pouvoir étudier le comportement humain de personnes immergées dans des contextes réalistes, interactifs et contrôlés. Cela présente pour les expérimentateurs le précieux avantage de pouvoir se détacher de toute contrainte physique, et du coût que nécessiterait la mise en œuvre réelle de ces environnements. Par ailleurs, les données expérimentales issues de ces expérimentations suggèrent fortement que les apprentissages dans les environnements virtuels permettent de générer des représentations de l'espace à certains degrés similaires, aux représentations acquises par l'exploration du monde réel (Witmer, Bailey et Knerr, 1996).

Dans le cadre de notre étude, les aspects audio de la réalité virtuelle sont d'un intérêt particulier, dans la mesure où la création d'espaces sonores peut s'appliquer de façon privilégiée aux personnes privées de vision. Pour cette raison, nous nous concentrons ci-dessous sur les possibilités de la réalité virtuelle audio mise au service de la recherche cognitive.

7.1.1. Réalité virtuelle audio : Recours à la synthèse binaurale

La synthèse binaurale est une technique qui permet de présenter de l'information auditive spatialisée directement au niveau du canal des oreilles de l'utilisateur, et d'imiter au plus près l'audition naturelle. L'encodage spatial d'une source sonore est permis par un filtrage naturel des sons arrivant aux deux oreilles de l'individu, à travers le phénomène de diffraction du son (autour du torse, de la tête, jusqu'à la forme complexe de l'oreille externe). Cette diffraction est caractérisée par les fonctions de transfert relatives de la tête, ou Head Related Transfer Function (HRTF). Les HRTFs contiennent les informations acoustiques telles que les différences de temps inter-aural, et des sélections spectrales complexes utilisées par le système auditif humain qui lui permettent d'interpréter la localisation d'événements sonores (Begault, 1994). Le principe est relativement simple : chaque bruit provenant de n'importe quelle direction de l'espace est codé par une paire spécifique de fonctions de transfert (oreille gauche et droite). La synthèse binaurale consiste donc à traiter un signal audio tel qu'il le serait par les HRTFs d'un individu, pour une position donnée, et à partir de là, recréer ces sources sonores virtuelles dans les écouteurs du participant.

Cette technique a cependant quelques limites. En effet, les localisations dans le contexte de rendu binaural statique (sans tracking de la tête) ont pour conséquence plusieurs artéfacts, dont les plus importants sont les confusions avant / arrière, c'est-à-dire qu'une source localisée à l'avant du participant pourra être perçue comme étant derrière lui, et inversement. Ces artéfacts sont dus à l'ambiguïté des différences inter-aurales qui sont alors symétriques relativement à l'axe inter-aural de l'individu. Le système auditif peut résoudre ces ambiguïtés en utilisant les mouvements de la tête, qui permettent de modifier l'information parvenant aux deux oreilles, et ainsi savoir clairement d'où provient la source sonore (Minnaar et al., 2001 ; Blum, Katz, et Warusfel, 2004). Par ailleurs, une particularité des HRTFs est que ces dernières sont dépendantes de la morphologie humaine. Ceci implique que pour permettre un rendu virtuel au plus proche de ce qui serait permis par l'oreille, la synthèse binaurale pour

être optimale devrait être individualisée. L'adaptation à des sélections acoustiques non-individuelles semble être possible, mais elle engendre une phase d'apprentissage additionnel.

7.1.2. Réalité virtuelle audio : Evaluation des sources sonores présentes dans la scène

L'audition spatiale concerne les localisations de sources spatiales ainsi que le revêtement des surfaces. La localisation égocentrique d'une source est spécifiée par des coordonnées spécifiques : en azimut (directions de la tête), élévation et distance (Loomis, Klatzky, Philbeck et Golledge, 1998). Ainsi, si l'observateur connaît à priori l'intensité d'une source sonore (d'un objet familier par exemple), la hauteur du son pourra lui servir à évaluer la distance absolue qui le sépare de la source sonore. En revanche, si cela n'est pas le cas, seules les distances relatives par rapport à la source sonore, dans des présentations successives, sera à même de l'informer (Mershon, 1997). Des études ont ainsi mis en évidence (Mershon et King, 1975 ; d'autres citées dans Coleman, 1963) que la manipulation des hauteurs de sons influençait directement les jugements de distance des observateurs.

Une autre coordonnée mise en jeu est l'élévation angulaire. De manière générale, les sources sonores sont situées au niveau des oreilles de l'observateur, reposant sur l'idée selon laquelle elles resteraient sur le plan horizontal ; si elles étaient émises au niveau du sol, elles seraient difficilement représentatives des sources en général (Philbeck et Loomis, 1997).

En présentant des cibles auditives aux mêmes emplacements que des cibles visuelles, des auteurs ont comparé la perception des distances visuelles et auditives dans les mêmes conditions expérimentales (Loomis et al., 1998). La tâche des participants consistait pour certains à évaluer la distance qui les séparait des sources sonores et la spécifier oralement à l'expérimentateur. Pour d'autres, après avoir perçu la source, soit visuellement, soit auditivement, les participants devaient diriger leur corps dans la bonne direction, et ensuite, soit marcher directement jusqu'à elle, soit l'atteindre à travers deux segments indirects. Les résultats montrent que les réponses verbales et motrices sont largement concordantes, les réponses motrices engendrant néanmoins moins de variabilités interindividuelles. De plus, dans les conditions où la distance par rapport aux cibles visuelles était perçue grâce à la réponse motrice (la plus précise), les cibles auditives étaient généralement perçues avec une erreur systématique considérable, avec une sous-estimation au moins de la moitié de la

distance par rapport aux cibles physiques (excepté dans le cas des cibles les plus rapprochées).

Plusieurs études ont ainsi été menées auprès de participants en milieux immersifs. En ce qui nous concerne, nous allons plus spécifiquement nous intéresser aux environnements virtuels dans lesquels des individus dépourvus de vision ont été plongés, et à qui il a été demandé de localiser des sources sonores.

7.2. Réalité virtuelle et non-voyants

Les précédentes études utilisant l'audio 3D pour des expérimentations de localisations de sources auditives, ou pour la construction d'interfaces audio pour les personnes non-voyantes reposent sur des plates-formes consacrées au rendu audio spatialisé sans aucune production de rendu graphique, ou très peu. Qu'il s'agisse de sources réelles (Minnaar, Olesen, Christensen, et Moller, 2001) ou bien appartenant à un monde virtuel (Frauenberger et Noisternig, 2003), le "tracking" de l'utilisateur est nécessaire, ainsi qu'un modèle géométrique de la scène dans laquelle évolue l'individu, qui doit être mis à jour en temps réel pour permettre à ce dernier d'avoir la sensation d'être immergé.

Lessard et ses collaborateurs (1998) ont testé des participants non-voyants sur des configurations spatiales tridimensionnelles. Les participants étaient évalués dans des conditions d'écoute monaurale ou binaurale. Les auteurs ont mis en évidence que les participants non-voyants pouvaient se faire une carte de l'environnement sonore, avec une aussi bonne, voire meilleure précision que les personnes voyantes. Par ailleurs, ces participants sont capables, contrairement aux voyants, de localiser correctement les sons même si ceux-ci ne sont présentés que monoralement. Ces auteurs sont ainsi parvenus à attester que les individus dépourvus du sens visuel ont de meilleures capacités auditives que les participants voyants, ceci leur permettant de compenser la privation de leur sens visuel.

Lewald (2002) tempère néanmoins ces conclusions en montrant que lorsque des participants non-voyants de naissance doivent localiser une source sur l'axe vertical (en élévation), la majorité d'entre eux montrent systématiquement des déviations dans les tâches de pointage, alors qu'une minorité sont aussi précis que les participants voyants contrôles. En revanche, les non-voyants comme les voyants sont capables de juger les positions relatives de

différentes sources sonores avec une précision similaire. Ces résultats suggèrent que l'expérience visuelle est impliquée dans le fait de calibrer la relation entre les coordonnées verticales de l'espace auditif et celles du corps. En revanche, le fait d'avoir ou non bénéficié d'une expérience visuelle précoce n'a pas d'influence sur la capacité de juger précisément de la localisation d'objets sonores dans l'espace.

7.3. Contribution expérimentale : Etude de l'imagerie mentale des non-voyants, mise en place d'une plate-forme de Réalité Virtuelle en audio 3D

Nous avons décidé de soumettre des participants à de nouvelles tâches d'imagerie mentale, mais après avoir été cette fois totalement immergés dans l'environnement à mémoriser. Il s'agissait ici de poursuivre l'investigation concernant l'influence des modalités sensorielles préservées sur les capacités d'imagerie des personnes non-voyantes. Nous avons donc envisagé d'immerger totalement nos participants dans un monde sonore, en vue d'observer leurs comportements et leurs capacités à localiser des sources sonores.

Au regard des résultats issus des deux premières expérimentations, nous avons voulu tester l'hypothèse selon laquelle une description verbale serait de nature à favoriser les performances des personnes voyantes (ici privées temporairement et artificiellement de vision), alors qu'une exploration active de l'environnement pourrait favoriser les personnes non-voyantes, qui seraient spécifiquement plus attentives à leur sens kinesthésique.

7.3.1. Description de la plateforme

Nous avons mis en place notre expérimentation sur une plate-forme de réalité virtuelle en audio 3D. Ce choix était d'autant plus intéressant qu'il nous permettait de soumettre les participants à des scènes auditives complexes, en faisant varier l'organisation et la composition spatiale de ces scènes, tout en laissant aux participants la possibilité d'interagir directement avec les différentes sources sonores. Le caractère immersif de l'expérience dans le monde virtuel permettait de donner aux participants le sentiment que les objets sonores qu'ils percevaient étaient réellement présents dans la pièce, et que malgré leurs mouvements, ils se trouvaient dans un environnement spatial stable et cohérent. Grâce à cette stabilité, et à la flexibilité de l'interaction dans les scènes dynamiques, l'environnement virtuel facilite

considérablement faciliter les études dans le domaine des sciences cognitives et comportementales, en particulier dans l'étude combinée de la perception, de la cognition et de l'action (Von der Heyde et Buelthoff, 2000).

Jusqu'à présent, les expériences qui ont eu recours à l'audio 3D pour des tests de localisation auditive ou bien pour la construction d'interfaces audio pour des personnes non-voyantes étaient proposées sur des plates-formes dédiées à un rendu audio spatialisé, qui n'avait pas ou très peu de rendu graphique. Bien que nous ayons utilisé les mêmes composantes de bases (i.e. le système de tracking et une représentation géométrique de la scène), notre approche a été différente puisqu'elle repose sur un outil ayant de pleines possibilités dans la manipulation des effets 3D multimédia, des modélisations comportementales, ainsi que des interactions entre les utilisateurs du système et les sources virtuelles composant la scène : Virtual Choreographer (VirChor). Nous avons choisi de travailler avec cet outil, en raison de la complexité de notre installation expérimentale, qui devait répondre avec une très grande précision au contrôle par l'expérimentateur de l'emplacement exact du participant et des différentes sources sonores actives, et ceci à chaque instant. Par ailleurs, la complexité du protocole expérimental et sa définition progressive par des expériences réelles nécessitait un langage de commande ouvert (non inclus dans le code du programme) permettant facilement d'opérer des modifications ou de nouveaux paramétrages, directement sur le site expérimental.

Dans la section suivante, nous présentons l'architecture de l'environnement ainsi que les conceptions logicielles permettant de spatialiser le son et le graphisme, aussi bien que de contrôler le comportement des interfaces face aux réponses des participants et aux besoins des expérimentateurs.

7.3.2. Description de l'architecture de l'environnement

Le contexte dans lequel s'inscrit notre étude expérimentale est basé sur un environnement virtuel purement auditif. Toutefois, une géométrie inhérente lui a été associée. En effet, les différentes sources sonores ne peuvent être correctement spatialisées que dans un cadre géométrique. L'espace physique dans lequel est projeté l'espace virtuel doit donc être représenté. La position du participant ainsi que celles des sources sonores doivent être

constamment mises à jour dans la géométrie 3D de l'environnement, afin de pouvoir maintenir les localisations relatives des sources sonores en fonction du positionnement du participant.

La scène multimédia dans laquelle l'expérience se déroule est une pièce (physique et virtuelle) dans laquelle des sources sonores sont positionnées. Le participant est équipé d'un dispositif permettant d'enregistrer le positionnement dans l'espace de sa tête, un "head-tracker", monté sur une paire d'écouteurs stéréophoniques. Par ailleurs, il tient à la main un dispositif de pointage, qui permet également de connaître en temps réel les positionnements ou directions désignés par le participant. Pour permettre ce contrôle expérimental en temps réel, l'expérimentateur est aidé par un feed-back visuel de la scène dans son entier, qui reflète l'état actuel de l'environnement virtuel : les sources sonores actives, leur localisation, et le positionnement du participant au sein de la scène. L'expérimentateur contrôle le cours de l'expérience et peut constamment vérifier l'état du système sur un écran d'ordinateur et avoir un accès direct à une vue d'ensemble, schématique, de la salle où se déroule l'expérience (voir Fig. 33).

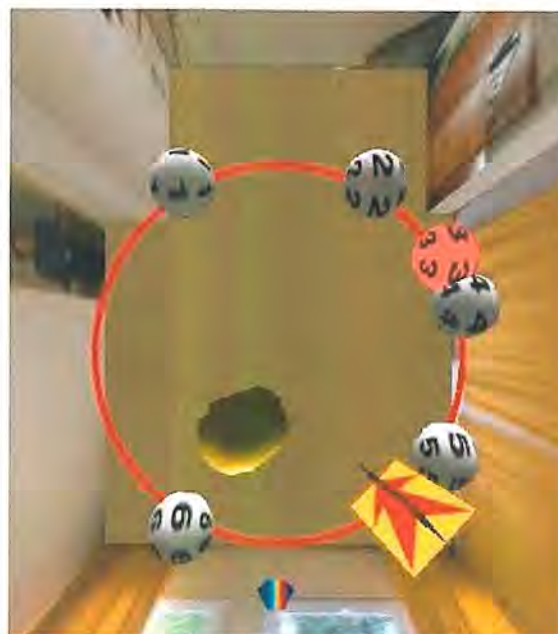


Figure 33 : Illustration du feedback visuel dont bénéficiait l'expérimentateur.

7.3.3. Choix expérimentaux

7.3.3.1. Recueil des réponses des participants

Au regard des résultats de Lewald (2002), nous avons décidé de disposer les sources sonores à hauteur de la tête des individus, de façon à éviter le biais dû aux difficultés des non-voyants de naissance à l'évaluation des sources sonores en élévation.

Ensuite, et afin de recueillir les réponses des participants aux différentes tâches que nous allons leur soumettre, nous les avons munis d'un pointeur. Ce choix nous a été inspiré par une étude menée en 1993, par Haber, Haber, Penningroth, Novak et Radgowski, qui se sont intéressés à la meilleure façon pour les participants d'indiquer les positions de sources actives distribuées sur un demi-cercle autour d'eux. Ils ont testé différentes méthodes et ont montré que celles qui permettaient une meilleure précision et le moins de variabilité inter-individuelle possible étaient celles qui recouraient à la méthode de pointage avec une partie du corps, par exemple, pointer le nez vers la cible, lui faire face avec la poitrine, ou tout simplement en la désignant avec l'index. De la même manière, le recours à des extensions de parties du corps, comme utiliser la canne blanche ou un petit bâton, permettait d'obtenir les meilleurs résultats.

7.3.3.2. Choix des HRTFs des participants

Le mouvement peut permettre de résoudre les ambiguïtés auditives telles que décrites précédemment, à savoir décider si une source sonore se trouve devant ou derrière soi (Minnaar, Olesen, Christensen, et Moller, 2001 ; Wightman et Kistler, 1999). Ainsi, le rendu binaural dynamique que nous avons utilisé dans le cadre de cette étude, nous a permis d'exploiter grâce au système de tracking, les mouvements principaux des participants, et de mettre constamment à jour la scène virtuelle.

Pour parvenir à mettre cela en œuvre, chaque participant devait décider au préalable l'HRTF optimal, à partir d'une base de données existante. Nous détaillerons la façon de procéder dans la section où nous décrirons la procédure expérimentale utilisée dans cette *expérience 3*.

Chapitre 8

Expérimentation en Réalité Virtuelle Audio 3D (*expérience 3*)

Dans ce cadre expérimental, les participants (nvn, nvt, vpv) ont été invités à évoluer dans un espace virtuel tridimensionnel dans lequel ils ont été immergés. Alors qu'ils étaient en train de résoudre les différentes tâches expérimentales, l'expérimentateur pouvait suivre sur des écrans d'ordinateur, dans une pièce adjacente, l'ensemble des mouvements des participants ainsi que leur position en temps réel au sein de l'environnement virtuel sonore.

8.1. Méthode

8.1.1. Participants

Cinquante-quatre participants ont pris part à cette expérimentation, répartis en neuf individus par groupes (nvn, nvt et vpv), testés dans l'une ou l'autre des deux conditions expérimentales : description verbale et exploration active. La sélection des participants a été effectuée en conservant les critères utilisés dans les deux expériences précédentes.

8.1.2. Matériel

8.1.2.1. Plate-forme expérimentale

Nous avons créé au sein du laboratoire un environnement de réalité virtuelle, audio et interactif, permettant à un participant de se déplacer et d'interagir au sein d'une scène 3D sonore. Cette plate-forme intègre différents éléments : des outils de modélisation géométrique 3D, de rendu visuel, de rendu sonore 3D, et des périphériques de captation de mouvement. Elle permet l'élaboration d'environnements complexes avec la possibilité d'un rendu graphique pour l'expérimentateur. Par ailleurs, elle permet une manipulation aisée et

combinée de l'ensemble des éléments qui composent cet environnement (principalement la position de six sources sonore).

L'utilisation de la réalité virtuelle était pour nous particulièrement intéressante puisqu'elle nous permettait d'opérer des modifications d'ordre métrique, plus ou moins fines selon nos critères, et d'ordre topologique, qui auraient comporté des risques pour nos participants et auraient été extrêmement coûteuse à mettre en œuvre dans le monde réel. De plus, le recours à cette technique nous assurait un placement précis des objets sonores. Nous avons utilisé un système de communication inter-logiciels : une architecture distribuée sur plusieurs machines qui nous a permis d'exploiter différents outils, adaptés aux fonctionnalités spécifiques de l'expérimentation, et surtout qui nous a permis de répartir les tâches et les coûts de calculs permettant d'assurer le rendu en "temps réel".

8.1.2.2. Composition de la scène virtuelle

La scène virtuelle a été générée au sein d'une pièce réelle rectangulaire (4 x 5 m) dans laquelle six sources sonores virtuelles ont été placées (Fig. 34). La configuration spatiale des sources sonores variait au cours de l'expérimentation, en fonction des actions du participant sur ces différentes sources, mais aussi en fonction des différentes tâches successives auxquelles les participants allaient être soumis.

Sur les écrans de contrôle de l'expérimentateur, et afin de lui permettre de suivre en temps réel l'évolution des tâches expérimentales qui se déroulaient, les sources sonores étaient représentées par des sphères numérotées : blanches (signifiant qu'elles étaient silencieuses) jusqu'à ce qu'elles deviennent actives, auquel cas, elles devenaient rouges (Fig. 35).

La scène était composée également d'une flèche et d'un avatar de la tête du participant, indiquant à la fois sa position et l'orientation de sa tête. La flèche représentait un pointeur que nous avons fourni aux participants afin qu'il puisse désigner et positionner chacune des sources sonores.

Enfin, la scène virtuelle était délimitée par les murs de la pièce dans laquelle se déroulait l'expérimentation (Fig. 35). Leur modélisation avait pour objectif d'éviter les collisions des participants, en signalant leur présence par une alerte sonore dans une zone de sécurité enveloppant les murs (Fig. 35).

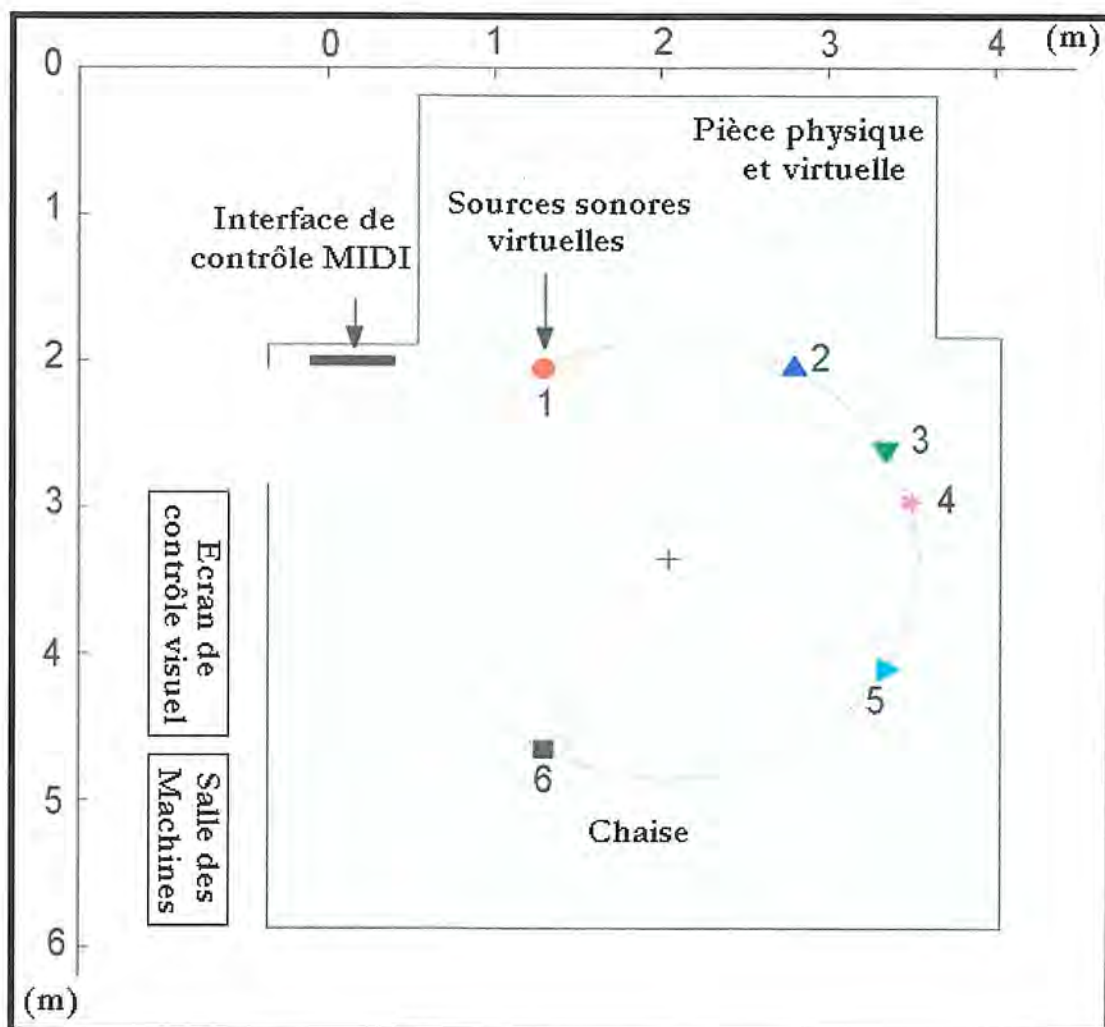


Figure 34 : Représentation schématique de la configuration du dispositif utilisé pour l'expérience 3.

La figure 35 montre un exemple de ce que pouvait observer l'expérimentateur durant l'expérience 3. Dans cette illustration, nous voyons que seule la source sonore 3 était activée, et que le participant lui faisait face. La position de la flèche indique que le pointeur était simplement tenu à la main par le participant (pointé vers le sol).

Pour permettre cette visualisation, nous avons utilisé un outil, VirChor (développé par C. Jacquemin, enseignant - chercheur au LIMSI-CNRS), permettant de modéliser à la fois le comportement de l'individu et son interaction avec le monde virtuel. Cet outil était particulièrement adapté aux besoins de l'expérimentation puisqu'il permettait à l'expérimentatrice de suivre, de façon très précise et en temps réel, la position des sources qui étaient ou non activées, ainsi que les déplacements des participants au sein de la scène virtuelle.

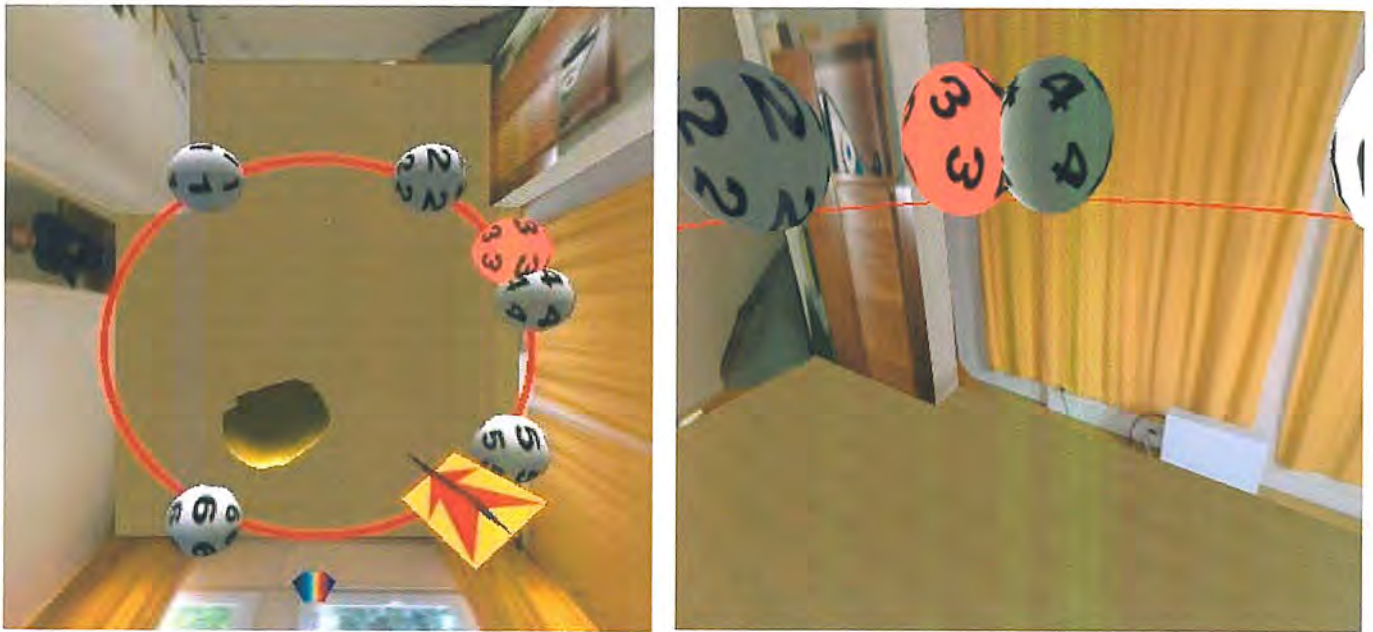


Figure 35 : à gauche, illustration d'une vue de dessus de l'ensemble de la scène virtuelle, à droite, illustration de la vue subjective d'un des participants.

8.1.3. Procédure

8.1.3.1. Phase préparatoire à l'immersion dans le monde virtuel

Chaque participant répondait dans un premier temps à un questionnaire, qui visait à nous apporter différentes informations concernant l'origine de sa cécité (pour les personnes non-voyantes), son niveau d'étude, sa profession, etc. Plus spécifiquement pour cette expérimentation, nous avons aussi évalué les éventuels troubles auditifs, avec comme premier objectif de ne pas soumettre cette expérience à des personnes ayant des troubles auditifs sévères. À cet effet, l'utilisation systématique d'un audiogramme nous a permis d'évaluer l'intégrité des capacités auditives de chacun des participants. L'audiogramme, ainsi que le protocole de passation étaient identiques à ceux utilisés en clinique.

Nous avons constaté au cours des passations expérimentales que des troubles auditifs considérés comme importants (chez les individus voyants), n'avaient en définitive que peu d'incidence sur les capacités des personnes non-voyantes à mémoriser et ensuite travailler sur l'environnement virtuel sonore.

Pour finir, nous mesurons la circonférence de la tête du participant, afin de le soumettre à la procédure de sélection de ses HRTFs. Le participant devait choisir à partir d'une première base, celui qui lui paraissait le plus vraisemblable. Il s'agissait de décider parmi plusieurs exemples ; un objet devant se déplacer tout autour de leur tête, lequel leur semblait décrire le cercle le plus parfait et le plus horizontal. Si parmi ces premiers exemples, le participant ne parvenait pas à identifier celui qui lui correspondait le mieux, il pouvait alors choisir parmi une liste plus étendue.

Après cette phase préparatoire, les participants étaient conduits jusqu'à la plate-forme par l'expérimentatrice, après qu'elle ait pris le soin de leur bander les yeux, dans le cas des participants voyants.

Elle guidait en premier lieu, le participant le long des murs, afin de lui permettre d'appréhender les dimensions et la configuration de la salle. Après cette exploration, les participants étaient placés devant une chaise qui allait servir de repère physique durant toute l'expérimentation. Cette chaise était en position centrale contre le mur du fond de la pièce. Quand le participant était à cet endroit précis, il savait que son espace de travail était juste devant lui, qu'il était centré par rapport à la pièce (autant d'espace entre lui et le mur de gauche qu'entre lui et le mur de droite), et que l'orientation de l'axe antéro-postérieur de son corps était parallèle aux murs latéraux.

8.1.3.2. Phase d'apprentissage

A partir de la chaise, le participant était amené jusqu'au centre du cercle virtuel. Là, il était informé qu'il venait de parcourir une distance de 1,5 mètre. Cette valeur était celle du rayon du cercle virtuel sur la périphérie duquel six sources sonores étaient disposées. Les six sources étaient les suivantes : un bain qui coule, sonnerie de téléphone, goutte à goutte dans un évier, machine à café, horloge et lave-linge.

Pour permettre au participant d'apprendre la configuration de l'environnement dans lequel il se trouvait, nous avons créé deux conditions expérimentales :

- Description verbale

Le participant, en position centrale du cercle virtuel, était oralement informé que son corps était orienté selon un axe 6h / 12h, et que son visage pointait la direction de 12h.

Il entendait ensuite un son, juste au-dessus de sa tête. L'expérimentatrice l'informait alors de la position exacte à laquelle il devait mentalement placer cette source sonore sur la périphérie du cercle, en utilisant la méthode du cadran horaire (utilisée dans la navigation aérienne). La position des différentes sources sonores lui était donnée en respectant le sens des aiguilles d'une montre. Par exemple, le participant entendait le son de l'eau du bain qui coule, pendant 3 secondes au-dessus de sa tête, après quoi l'expérimentatrice lui demandait de le positionner mentalement sur le cercle à la position de 11h. Quand le participant considérait avoir correctement positionné cette source, l'expérimentatrice lui proposait la source sonore suivante, et ainsi de suite pour les six sources. Grâce à cette description verbale de l'emplacement des différentes sources sonores, le sujet devait se créer une représentation mentale de la scène aussi nette et détaillée que possible.

- Exploration active

Dans cette condition, le participant était placé au centre du cercle virtuel, suivant la même orientation de son corps que celle décrite pour la condition précédente. Il entendait une source sonore issue précisément de la périphérie du cercle virtuel. A partir du centre de ce cercle, le participant devait physiquement se rendre jusqu'à l'endroit exact d'émission de cette source sonore. Il se dirigeait ainsi jusqu'à avoir la sensation d'être sous la source sonore en question. A partir de là, le participant était ramené au centre du cercle virtuel par l'expérimentatrice, à l'exception de quelques personnes qui préféraient retrouver seules l'emplacement de ce centre. Une autre source sonore était alors émise à la périphérie du cercle, et le participant devait se rendre au niveau de cette source pour apprendre son positionnement exact. Cette procédure était répétée ainsi, jusqu'à ce que l'ensemble des six sources sonores soient appréhendées par les participants.

8.1.3.3. Phase de vérification de l'apprentissage

Chacune des sources était émise l'une après l'autre, au dessus de la tête du participant, dans un ordre aléatoire. Dans la condition d'apprentissage par description verbale, après avoir entendu une source sonore, le participant devait donner sa position, en utilisant la méthode du cadran horaire.

Dans la seconde condition, le participant disposait d'un pointeur pour désigner l'emplacement exact de la source sonore. La réponse du participant était, dans ce cas précis,

jugée sur le rendu graphique auquel avait accès l'expérimentateur en temps réel (sur les écrans d'ordinateur de la pièce adjacente). La position était jugée correcte si la direction ciblée était à l'intérieur d'un angle de $\pm 10^\circ$ autour de la position exacte de l'objet.

Dans chacune des deux conditions, la procédure d'apprentissage et sa phase de vérification étaient répétées jusqu'à ce que la réponse du participant soit parfaitement correcte pour chacune des sources sonores.

8.1.4. Phase de test

Plusieurs tâches expérimentales ont été proposées aux participants durant l'*expérience 3*. Dans le cadre de cette thèse nous nous intéressons principalement aux expériences d'exploration mentale de distances ainsi que de comparaison mentale de distances. Néanmoins, nous avons, pour des travaux ultérieurs, soumis les participants à deux autres tâches spécifiques au sein de l'environnement virtuel. Les résultats sont en cours d'analyse et ne seront pas spécifiquement abordés ici. Néanmoins, avant de nous consacrer aux données issues des tâches d'exploration mentale de distances, et de comparaison mentale de distances, nous présenterons brièvement quelques résultats issus d'une tâche de reconstruction.

8.1.4.1. Reconstruction de la scène initiale (tâche 1)

Après avoir appris la configuration spatiale de l'environnement dans lequel il était immergé, le participant était placé au centre du cercle virtuel, alors que toutes les sources sonores étaient désactivées.

Il entendait brièvement (pendant 3 secondes) un premier son, délocalisé (émis juste au-dessus de sa tête) et avait pour tâche d'aller le positionner à sa place initiale. Les sources sonores étaient présentées dans le même ordre d'apparition que dans la phase d'apprentissage.

Le participant devait se déplacer et positionner la source sonore à l'endroit précis qu'il considérait être sa position dans la scène initiale. Pour cela, il devait utiliser le pointeur comme s'il s'agissait d'un bâton, le tenant à la verticale, et désigner l'endroit précis de la source sonore. Une fois que le participant considérait avoir retrouvé la localisation de la source, il maintenait à hauteur de bras le pointeur et l'expérimentateur rendait alors active la

source sonore à cet emplacement précis. Une fois qu'une source était rendue active, elle le restait. Les autres sources étaient ensuite ainsi présentées les unes après les autres.

Une fois la première source localisée, le participant était ramené jusqu'au centre du cercle virtuel, puis jusqu'à la chaise, permettant une nouvelle évaluation de la distance équivalente au rayon du cercle (1,5 mètre). Il s'agissait ici de modifier explicitement le point de référence des participants, puisqu'ils devaient alors positionner les sources sonores à partir du fond de la salle.

Ainsi, à partir de la chaise, le participant entendait la source sonore suivante, allait la placer grâce au pointeur, puis revenait se positionner au niveau de la chaise (guidé ou non par l'expérimentatrice, selon sa demande). Progressivement, toutes les sources étaient émises dans l'enceinte de l'environnement virtuel.

Une fois que toutes les sources avaient été positionnées par le participant, l'expérimentateur les désactivait afin d'expliquer la suite de la procédure.

Le participant était replacé au centre du cercle virtuel et était informé que la configuration spatiale des sources sonores telles qu'il les avait disposées allait de nouveau lui être présentée. Il aurait alors le loisir de se déplacer librement dans l'enceinte de l'environnement, avec pour objectif de déterminer si les sources sonores étaient correctement positionnées. Dans le cas où la localisation d'une source sonore était erronée, le participant devait dans un second temps, toujours à l'aide du pointeur, déterminer le positionnement le plus juste de la source sonore. L'expérimentatrice activait alors l'ensemble de la configuration telle que construite par le participant. Après avoir exploré la scène et informé l'expérimentateur qu'il avait repéré quelles étaient les modifications à apporter à la scène sonore, le participant entendait une première source sonore. Il devait alors décider si la première position lui convenait, et le cas échéant la localiser à nouveau de manière plus précise.

Grâce à cette tâche, nous avons pu recueillir de nombreuses informations, comme par exemple, mesurer la différence de positionnement entre l'emplacement réel des sources sonores, et celui décidé par les participants : nous avons ainsi mesuré la variation de positionnement angulaire, radial, et l'erreur absolue de positionnement.

Par ailleurs, grâce au système de tracking, nous avons enregistré les déplacements effectués par les participants pour résoudre la tâche expérimentale. Les données font l'objet d'analyses spécifiques. Elles sont de nature à nous informer sur les stratégies exploratoires utilisées par les participants pour évaluer l'exactitude de l'emplacement des sources sonores tel qu'ils les ont replacées en se basant sur la représentation qu'ils s'étaient créés de cet

environnement. Au-delà, l'analyse de ces trajectoires doit nous informer sur les stratégies (de déplacement) grâce auxquelles les individus, selon leur groupe expérimental et selon la condition d'apprentissage de l'environnement, décident de positionner les sources sonores.

8.1.4.2. Détection de modifications dans des variantes de la scène initiale (tâche 2)

La seconde tâche expérimentale consistait à présenter aux participants quatre variantes de la scène initiale, plus la scène correcte, et de leur demander s'ils détectaient un changement quelconque par rapport à la configuration initiale.

Plusieurs types de modifications ont été introduits, soit en intervertissant deux sources sonores (« type interversion »), soit en déplaçant une ou deux des sources sonores à une nouvelle position sur la périphérie du cercle virtuel (« type déplacement métrique »).

Le participant n'était pas informé du type de modification opéré pour ne pas induire d'attentes précises, ni susciter une attention particulière relative à de tels aspects. Il apprenait avant de commencer la tâche qu'il pouvait y avoir uniquement un ou deux types de changements au sein de l'environnement, ou bien aucun, mais jamais au-delà.

Le participant était placé au niveau de la chaise, et avait pour consigne de rester à cet emplacement jusqu'à l'émission de la première source sonore. Il était ensuite libre de se déplacer ou de faire ce qui lui semblait utile pour déterminer si des modifications avaient été opérées sur l'environnement, et si tel était le cas, de les signifier à l'expérimentatrice.

Ainsi, lorsque le participant indiquait avoir repéré une interversion entre deux sources sonores, l'information était relevée par l'expérimentateur. En revanche, lorsqu'il s'agissait de modifications de type métrique, le participant indiquait la position qui aurait dû être occupée par cette source à l'aide du pointeur. L'expérimentateur enregistrait systématiquement ces informations. Tout comme pour la tâche 1, l'ensemble des déplacements des participants était enregistré.

8.1.4.3. Exploration mentale de distances (tâche 3)

Le participant devait ensuite effectuer une tâche d'exploration mentale de distances. La procédure était identique à celle utilisée dans *l'expérience 1* (voir la première partie du chapitre 5). Cependant, cette tâche se déroulant après un 2 à 3 heures d'immersion dans le

monde virtuel, nous avons proposé une version courte, consistant en 18 trajets à effectuer mentalement (9 trajets étant parcouru deux fois chacun, dans un sens puis dans l'autre) sur 35 paires de distances.

Le participant était conduit dans une pièce différente de celle où était simulé l'environnement virtuel. Il avait pour tâche de se remémorer la configuration spatiale des différentes sources sonores au sein de l'environnement virtuel, pour ensuite effectuer des déplacements mentaux entre elles.

Il entendait ainsi deux sources sonores, la première appartenait à la configuration qu'il venait d'apprendre. Dans la moitié des cas, la seconde source appartenait elle aussi à cette configuration. En revanche, dans l'autre moitié des cas, la seconde source n'avait pas été entendue auparavant. Dans le cas où la seconde source faisait partie de la configuration initiale, le participant devait appuyer avec sa main dominante sur la touche d'un clavier d'ordinateur mis à sa disposition, et ceci, après avoir effectué un déplacement mental en ligne droite, entre les deux sources sonores. Tout comme dans *l'expérience 1*, il devait imaginer un petit point noir se déplaçant entre la première et la deuxième source sonore, en ligne droite, et à vitesse constante.

Si, en revanche, il s'agissait d'une source qui ne faisait pas fait partie de la configuration initiale, le participant répondait directement en appuyant sur la touche correspondant à sa main non dominante. Comme dans *l'expérience 1*, les temps de réponse associés aux déplacements mentaux étaient enregistrés.

8.1.4.4. Comparaison mentale de distances (tâche 4)

Le participant effectuait ensuite une tâche de comparaison mentale de distances. La procédure était identique à celle utilisée dans *l'expérience 2* (voir la première partie du chapitre 6). Comme pour la tâche 3, nous avons proposé une version courte de cette expérimentation. Les participants devaient effectuer 28 comparaisons de distances (dont 8 pour les petites différences (D1), 10 pour les différences moyennes (D2), et 10 pour les grandes différences (D3)).

Dans cette tâche, le participant devait se remémorer la configuration de la scène, et comparer ensuite mentalement les distances séparant deux paires de sources sonores. Par exemple, il devait comparer la distance entre les sources sonore "eau du bain / horloge", avec celle entre les sources sonore "eau du bain / sonnerie de téléphone". Le participant devait

décider quelle distance était la plus longue et devait répondre en appuyant sur l'une des deux touches du clavier de l'ordinateur mis à sa disposition. Les réponses des participants ainsi que les temps de réponse associés étaient enregistrés.

8.2. Analyse des résultats

Les données issues des tâches 1, 3 et 4 de *l'expérience 3* ont été soumises à des analyses de variance (ANOVA), ainsi qu'à des analyses du coefficient de corrélation entre les temps de réponse et les distances (tâche3, STATISTICA, version 6.0, www.statsoft.com). Dans le cas d'un effet significatif d'une des variables indépendantes ou de leurs interactions (groupe x distance, par exemple), cette analyse a ensuite été suivie par une analyse post-hoc, test de comparaison multiple deux à deux, le test *F* de Scheffé.

8.2.1. Reconstruction de la scène initiale (*tâche 1*)

Dans cette partie de l'expérimentation, nous avons mesuré la différence entre la configuration spatiale initiale de la scène et sa reconstruction par les individus. Nous rappelons que notre objectif principal était d'évaluer l'influence d'une modalité d'apprentissage, et / ou de l'expérience visuelle sur la préservation des propriétés métriques de l'environnement, ainsi que sur son organisation topologique. Les effets du mode d'acquisition et / ou de l'expérience visuelle ont été analysés en évaluant les erreurs de positionnement suivant les angles, l'erreur radiale (cf. définitions infra) et les distances absolues, en comparaison avec les localisations des objets correspondants sur la périphérie du cercle virtuel. Un fichier d'analyse détaillée a été créé durant la phase expérimentale pour chaque participant. Ce fichier contient la trajectoire, l'orientation de la tête, et d'autres actions remarquables du participant ainsi que les commandes de l'expérimentateur. Nous avons la possibilité d'avoir une visualisation en temps réel de la phase expérimentale en utilisant l'ensemble de ces informations schématisées par la figure 36.

Une analyse des erreurs dans chacune des conditions d'apprentissage sera de nature à révéler si l'une ou l'autre des modalités d'apprentissage permet de générer une représentation spatiale plus précise lorsque les participants doivent reconstruire ce qui, selon eux, correspond à la configuration de ce qu'ils ont appris.

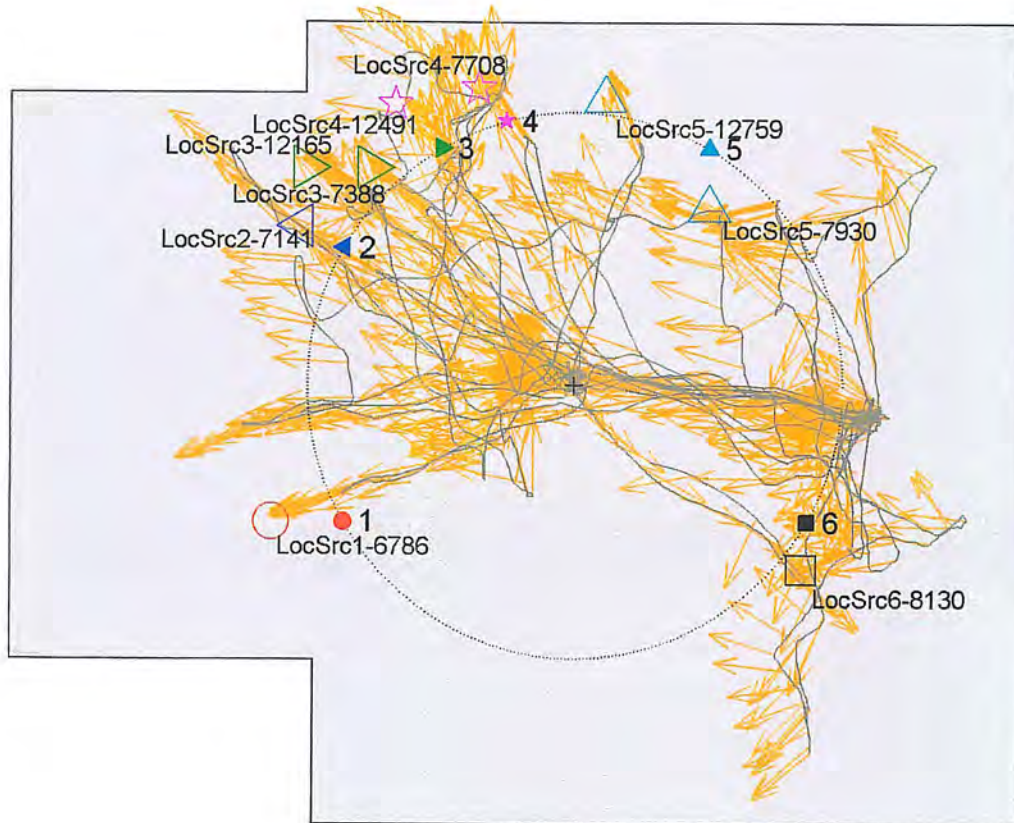


Figure 36 : Exemple d'une représentation schématique (visualisation d'un "log" expérimental) des trajectoires d'un participant, et de l'orientation de sa tête dans la scène virtuelle recréée. Cet exemple illustre la trajectoire opérée par un participant non-voyant tardif, à la suite d'une description verbale de la scène. Les petits symboles "pleins" situés sur la périphérie du cercle (en pointillé) représentent l'emplacement correct de chacune des sources sonores. En revanche, le même symbole, légèrement plus grand, de la même couleur, et transparent, représente la localisation choisie par le participant pour positionner la source sonore.

8.2.1.1. Erreur angulaire pour l'ensemble des groupes

L'erreur angulaire est définie comme l'erreur absolue en degrés, calculée à partir du centre du cercle, de la position désignée par le participant, en comparaison à la position de référence de la source sonore correspondante. Nos résultats indiquent que la modalité d'apprentissage n'a pas induit de différences d'erreur angulaire significatives à la suite de l'apprentissage par description verbale ($m = 17^\circ$; $SD = 14$), ni à la suite d'une exploration active ($m = 20^\circ$; $SD = 17$), sans distinction des groupes de participants.

En revanche, les erreurs angulaires varient significativement entre les groupes ($F(2,48) = 4,52$; $p < 0,041$). En particulier, les participants nvn ont fait significativement plus d'erreurs ($m = 23^\circ$; $SD = 17^\circ$) que les nvt ($m = 16^\circ$; $SD = 15^\circ$; $p = 0,041$), et que les participants vpv ($m = 16^\circ$; $SD = 13^\circ$; $p = 0,019$).

8.2.1.2. Erreur de rayon pour l'ensemble des groupes

L'erreur radiale est définie par l'erreur de la distance sur le rayon du cercle. Elle est calculée à partir du centre du cercle, entre la position de la source sonore correcte et celle qui a été placée par les participants, selon la périphérie du cercle. Pour les deux conditions d'apprentissage, après la description verbale comme après une exploration active, les participants nvn et nvt sous-estiment les distances selon les mêmes proportions ($m = 0,2$ m), avec un écart type similaire (0,3 m et 0,4 m respectivement). Une particularité apparaît clairement pour le groupe des vpv, qui sous-estiment la position des sources sonores le long du rayon du cercle à la suite de la description verbale de l'environnement (moyenne \pm SD : $-0,2 \pm 0,3$ m) alors que cela n'est plus le cas à la suite de l'exploration active de l'environnement (moyenne \pm SD : $0,0 \pm 0,4$ m ; $F(2,48) = 3,32$; $p = 0,045$).

Dans le cas d'une exploration active de l'environnement virtuel, les participants voyants privés temporairement de vision sont capables de replacer les sources sonores exactement sur la périphérie du cercle virtuel (mais ils la sous-estiment après un apprentissage par description verbale), alors que les groupes des personnes non-voyantes sous-estiment systématiquement sa taille, quelle que soit la condition expérimentale.

Erreur de rayon	Description verbale			Exploration active		
	VPV	NVT	NVN	VPV	NVT	NVN
Moyenne	- 0,2 m	- 0,2 m	- 0,2 m	0 m	- 0,2 m	- 0,2 m
Ecart-type	0,3 m	0,4 m	0,3 m	0,4 m	0,4 m	0,3 m
Différence VPV -VPV	-----*					

Tableau 3: Récapitulatif des erreurs de rayon en fonction du groupe de participants et de la condition d'apprentissage.

8.2.1.3. Erreur en distance absolue pour l'ensemble des groupes

L'erreur en distance absolue est définie comme la distance entre la position des sources originales et la position désignée par les participants. Les données montrent un effet significatif de la condition d'apprentissage ($F(1,48) = 4,29$; $p = 0,044$). L'exploration active de l'environnement permet une meilleure estimation de la position absolue des sources sonores (moyenne \pm SD : $0,6 \pm 0,3$ m) comparée à l'apprentissage par description verbale (moyenne \pm SD : $0,7 \pm 0,4$).

En revanche, les données ne montrent aucune différence significative entre les groupes de participants (moyenne \pm SD exprimée en m : nvn : $0,7 \pm 0,4$; nvt : $0,6 \pm 0,3$; vpv : $0,6 \pm 0,3$).

Erreur en distance absolue	Description verbale	Exploration Active
Moyenne	0,7 m	0,6 m
Ecart-type	0,4 m	0,3 m
Différence	-----*	

Tableau 4: Récapitulatif des erreurs en distance absolue en fonction de la condition d'apprentissage.

Erreur en distance absolue	VPV	NVT	NVN
Moyenne	0,6 m	0,6 m	0,7 m
Ecart-type	0,3 m	0,3 m	0,4 m

Tableau 5: Récapitulatif des erreurs en distance absolue en fonction du groupe de participants.

8.2.1.4. Réponses au questionnaire pour l'ensemble des groupes

Après l'immersion dans le monde virtuel, nous avons soumis les participants à un questionnaire pour recueillir des informations concernant cette expérience. Les deux informations les plus pertinentes, concernent l'alerte sonore et la perception de la latence. Ainsi, nous avons demandé aux participants si l'alerte sonore prévenant les collisions avec les murs (sous forme d'une rafale de vent) leur avait semblé efficace dans leur évitement des murs. Les résultats montrent que 93% des participants ont répondu oui, sans aucune différence entre les trois groupes.

Nous avons aussi cherché à savoir si les participants avaient perçu une certaine latence, dans le système, définie comme le délai perçu entre les mouvements des participants et la mise à jour des positions des sources. La latence a été perçue par 54% des participants, sans aucune différence entre les groupes. Dans le cas où les participants avaient finalement perçu cette latence, systématiquement, ils rapportaient avoir adapté leur comportement en réduisant la vitesse de leurs déplacements au sein de l'environnement virtuel.

8.2.1.5. Résumé issu de la tâche 1

En résumé, les analyses comparant les deux conditions d'apprentissage auxquelles nous avons soumis les participants montrent qu'en ce qui concerne la justesse de positionnement angulaire des sources sonores, les erreurs sont identiques que l'environnement ait été appris par description verbale ou bien par exploration active. En revanche, les non-voyants de naissance jugent significativement moins bien du positionnement (horaire) des sources sonores au sein du cercle virtuel que les non-voyants tardifs et voyants privés temporairement de vision.

Les données obtenues grâce à la mesure de l'erreur radiale montrent que quel que soit le groupe auquel ils appartiennent, les participants sous-estiment la taille du cercle virtuel sur la périphérie duquel sont positionnées les sources. Une exception cependant pour les participants voyants privés de vision, dans la condition d'exploration active, qui positionnent de manière très précise les sources sonores sur la périphérie du cercle virtuel.

Enfin, l'analyse des erreurs en distance absolue suggère que la condition d'apprentissage par exploration active augmente la justesse de positionnement par rapport à la description verbale, et ceci, indépendamment du groupe auquel appartiennent les participants.

8.2.2. Exploration mentale de distances (tâche 3)

Pour constituer la version courte de la tâche d'exploration mentale de distance, nous avons transposé les distances à évaluer à partir de l'apprentissage de la de petite configuration, à celles à partir de l'environnement virtuel. Nous n'avons proposé que 9 distances, permettant d'évaluer chacune les deux trajets effectués dans un sens puis dans l'autre (par exemple: eau du bain / téléphone, puis téléphone / eau du bain). Dans la version initiale, une même distance pouvant faire l'objet de trajets différents (ex : eau du bain / téléphone et goutte / horloge), elle pouvait être évaluée 2 ou bien 3 fois. Dans le cas de la version courte, nous n'avons gardé que 9 trajets ou chaque distance n'était évaluée qu'une seule fois. Le plan expérimental était le suivant: $S9 < G3 * C2 > * D9$ (Des groupes de 9 participants (S9) répartis chacun dans un des 3 groupes expérimentaux (G3), selon une des deux conditions d'apprentissage (C2), effectuaient tous des explorations mentales sur 9 distances (D9)).

8.2.2.1. Chez l'ensemble des participants

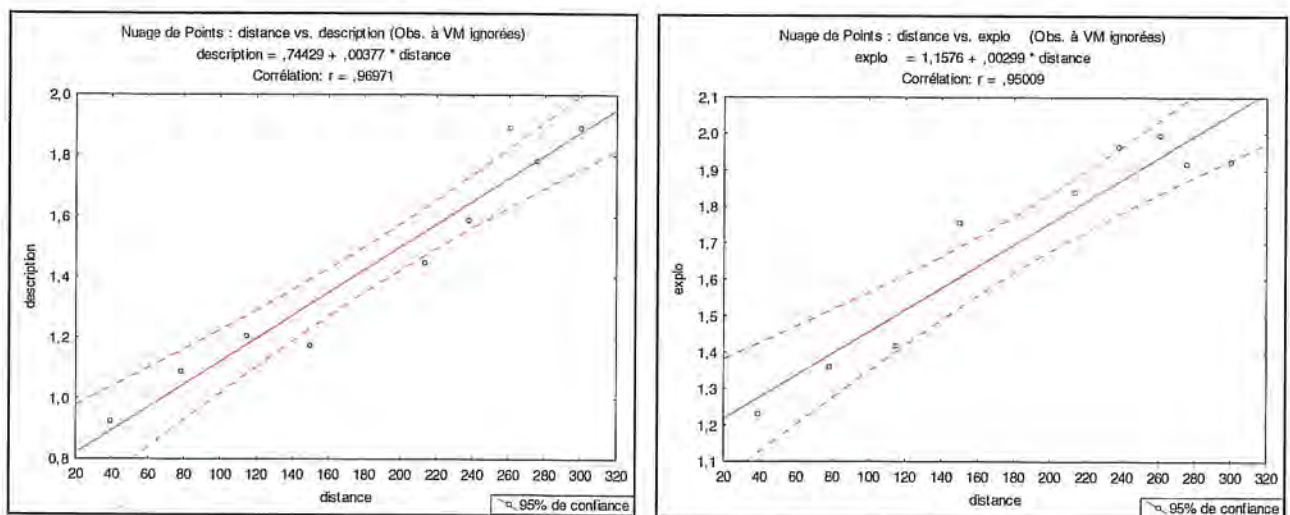


Figure 37: Droite de régression issue des données moyennées sur l'ensemble des participants (vpv, nvt, nvv) à la suite d'une description verbale de l'environnement (37A, à gauche), ou à la suite d'une exploration active de l'environnement (37B, à droite).

Pour l'ensemble des participants, nos résultats indiquent que la durée d'exploration mentale de distances entre deux sources sonores de l'environnement varie significativement en fonction de leur longueur à la suite d'un apprentissage par description verbale ($r(7) = 0,97$; $p < 0,01$; 37A), ou d'une exploration active ($r(7) = 0,95$; $p < 0,01$; Fig. 37B). En d'autres termes, plus la distance est grande plus le temps d'exploration mentale est long. L'analyse de variance ne révèle pas de différence significative entre les deux conditions d'apprentissage.

8.2.2.2. Chez les participants voyants privés temporairement de vision

Les données recueillies pour les participants vpv montrent qu'il existe une corrélation positive forte qui associe le temps mis pour explorer mentalement une distance à la longueur de cette distance dans le cas d'un apprentissage de l'environnement par description verbale ($r(7) = 0,94$; $p < 0,05$; Fig. 38A). En revanche, la durée d'exploration mentale ne varie pas systématiquement en fonction de la distance à parcourir si l'environnement a été appris par exploration active ($r(7) = 0,10$; $p < 0,05$; Fig. 38B). L'analyse de variance révèle que pour les participants voyants privés temporairement de vision, les temps de réponses sont du même ordre de grandeur dans les deux conditions expérimentales.

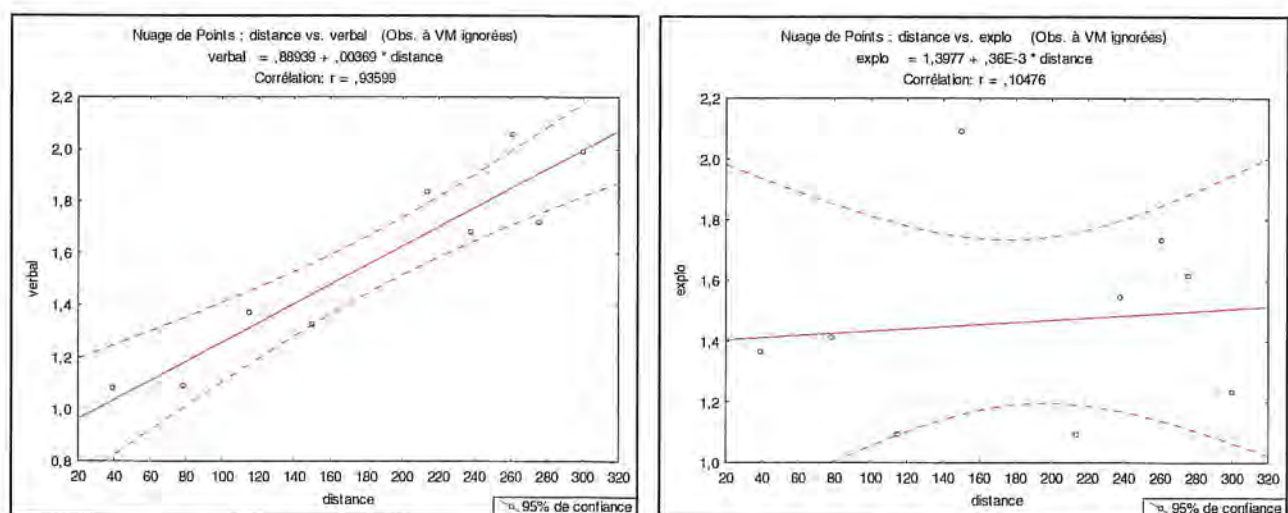


Figure 38 : Droite de régression issue des données obtenues par les participants voyants privés de vision, à la suite d'une description verbale (Fig. 38A, à gauche) et à la suite d'une exploration active (Fig. 38B, à droite) de l'environnement mémorisé.

8.2.2.3. Chez les participants non-voyants tardifs

Les résultats montrent que la durée d'exploration mentale de distances entre deux sources sonores de l'environnement est significativement corrélée à la distance qui les sépare, à la suite d'un apprentissage par description verbale ($r(7) = 0,91$; $p < 0,05$; Fig. 39A), ou à la suite d'une exploration active ($r(7) = 0,84$; $p < 0,05$; Fig. 39B). Comme pour les participants voyants privés temporairement de vision, l'analyse de variance révèle que pour les participants non-voyants tardifs, les temps de réponses ne diffèrent pas entre les deux conditions expérimentales.

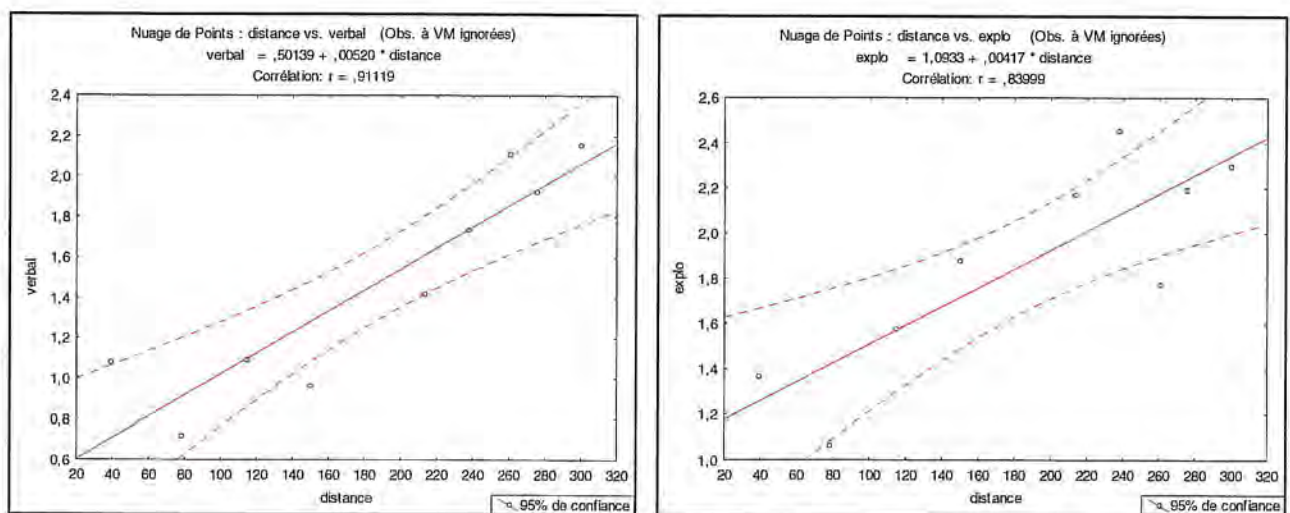


Figure 39 : Droite de régression issue des données obtenues par les participants non-voyants tardifs, à la suite d'une description verbale (Fig. 39A, à gauche) et à la suite d'une exploration active (Fig. 39B, à droite) de l'environnement mémorisé.

8.2.2.4. Chez les participants non-voyants de naissance

Dans le cas des participants dépourvus d'expérience visuelle, l'analyse révèle une corrélation significative entre la distance séparant deux sources sonores et le temps nécessaire à son parcours, suite à une description verbale de l'environnement ($r(7) = 0,69$; $p < 0,05$; Fig. 40A). Notons cependant que le coefficient de corrélation est plus faible que pour le groupe des vpv.

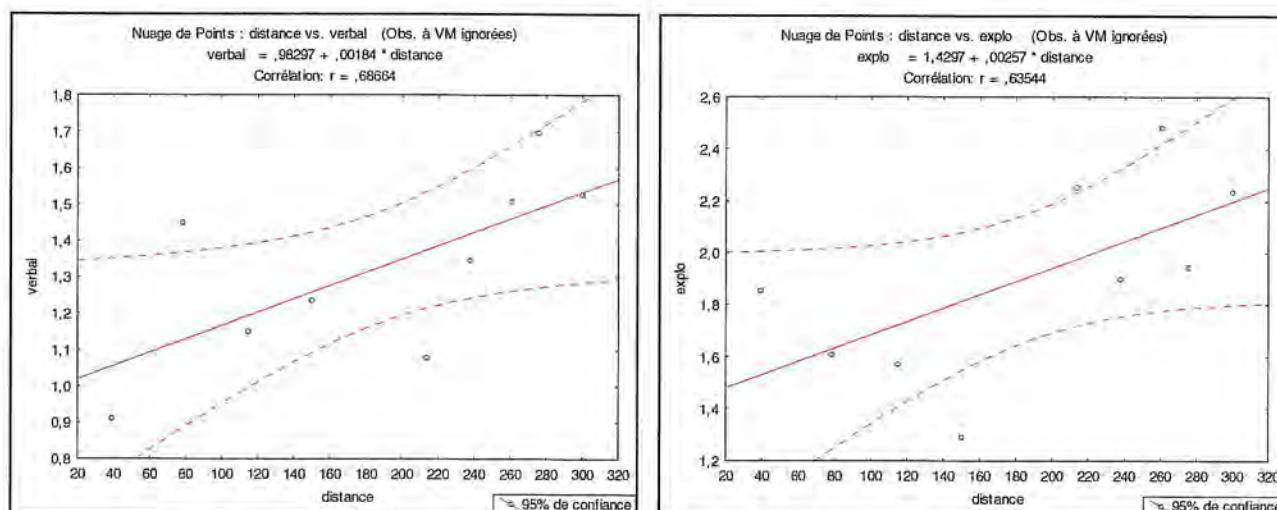


Figure 40 : Droite de régression issue des données obtenues par les participants non-voyants de naissance, à la suite d'une description verbale (Fig. 40A, à gauche) et à la suite d'une exploration active (Fig. 40B, à droite) de l'environnement mémorisé.

En revanche, après un apprentissage par exploration active de l'environnement, les résultats montrent une corrélation positive entre la distance et le temps de parcours mental, alors que la valeur du coefficient de corrélation n'est plus significative ($r(7) = 0,63$; $p < 0,05$; Fig. 40B).

8.2.2.5. Résumé issu de la tâche 3

En résumé, les résultats principaux de la tâche 3 révèlent que la durée d'exploration mentale de distances entre les sources sonores présentent dans un environnement ouvert à des déplacements physiques varie selon une fonction linéaire et croissante au fur et à mesure que la distance augmente, aussi bien pour les participants voyants (privés artificiellement de vision) que non-voyants (de naissance ou tardive), mais uniquement dans le cas où l'environnement est acquis par transmission verbale.

Dans le cas où l'apprentissage de cette configuration se fait par une exploration active, seuls les participants dépourvus de vision tardivement présentent une durée d'exploration mentale augmentant significativement avec la longueur de la distance à parcourir. Dans le cas des personnes dépourvues d'expérience visuelle précoce, la durée d'exploration mentale de distances apparaît varier en fonction de la longueur de celles-ci, sans toutefois atteindre le

niveau requis de significativité, alors que pour les personnes voyantes - privées artificiellement de vision - cette relation est très clairement absente.

Les résultats indiquent donc que le mode d'apprentissage de l'environnement à mémoriser (description verbale, exploration active) affecte la relation associant le temps d'exploration mentale et la distance à parcourir selon que la personne a été dépourvue totalement d'expérience visuelle ou bien qu'elle en a été privée artificiellement et temporairement, et ceci dans le cas d'un environnement à échelle réelle.

8.2.3. Comparaison mentale de distances (tâche 4)

8.2.3.1. Analyse des pourcentages de réponses correctes

Le plan expérimental de cette expérimentation était le suivant: $S9 < G3 * C2 > *D3$ (Des groupes de 9 participants (S9) répartis chacun dans un des 3 groupes expérimentaux (G3), selon une des deux conditions d'apprentissage (C2), effectuaient tous des comparaisons mentales de trois types de différences de distances (D3)).

Dans cette tâche, nous avons cependant retiré les participants quand 50% ou plus, d'erreurs étaient recueillies dans l'exécution de la tâche. Ainsi, les performances de deux hommes non-voyants de naissance, d'un non-voyant tardif ainsi que d'un voyant gardant les yeux ouverts ont été retirés des groupes expérimentaux dans la condition par description verbale, alors que de telles exceptions ne se sont pas présentées à la suite de l'acquisition par exploration active de l'environnement.

Dans cette expérience (tâche 4), nous avons conduit une analyse des réponses correctes des participants. Ces informations ont ensuite été proposées sous la forme de pourcentages, pour en faciliter la lecture. Ces données nous informent sur la qualité de la représentation mentale des participants. En effet, plus le pourcentage de réponse correcte est important et plus cela indique que les participants ont créé une représentation correcte de la configuration, en préservant les relations métriques entre les différents objets de l'environnement.

8.2.3.1.1. Chez l'ensemble des participants

8.2.3.1.1.1. Effet de la modalité d'acquisition

Les données que nous avons obtenues ne montrent pas de différences significatives entre les deux modalités d'acquisition utilisées dans cette expérimentation. Ainsi, quelle que soit la modalité d'acquisition de l'environnement, celle-ci n'a pas d'influence notable sur les pourcentages de réponses correctes des participants (Fig. 41).

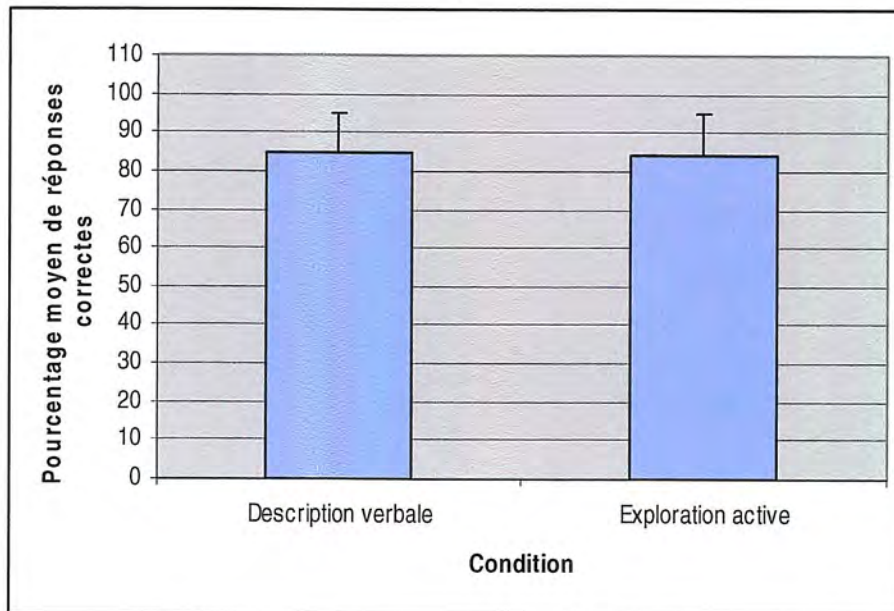


Figure 41: Pourcentage moyen de réponses correctes en fonction de la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration active), indépendamment du groupe (vpv, nvt, nvn), et de la différence de distances (petite, moyenne, grande).

8.2.3.1.1.2. Effet de la variable groupe

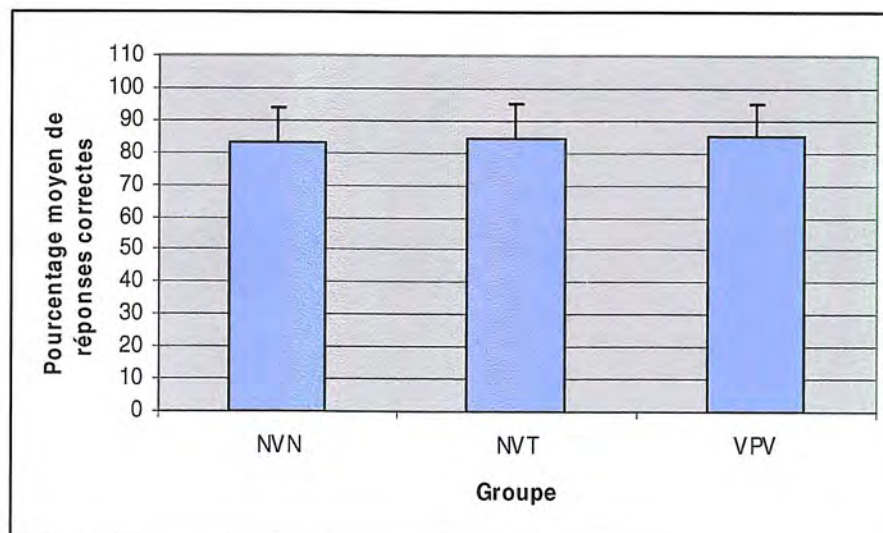


Figure 42: Pourcentage moyen de réponses correctes en fonction du groupe de participants (vpv, nvt, nvn), et indépendamment de la différence de distances (petite, moyenne, grande), ainsi que de la condition d'apprentissage de l'environnement (description verbale, exploration active).

Les résultats indiquent que le pourcentage de réponses correctes ne varie pas significativement en fonction du groupe de participants (nvn, nvt, vpv). Ainsi, qu'il y ait eu une expérience visuelle précoce ou non, les participants parviennent aux mêmes pourcentages de réponses correctes (Fig. 42).

8.2.3.1.1.3. Pourcentage de réponses correctes en fonction de la distance

Les résultats montrent que le pourcentage de réponses correctes dépend significativement de la différence de distances lorsque ne sont pas distingués les groupes et la modalité d'acquisition de la tâche ($F(2,188) = 42,076$; $p \sim 0$; Fig. 43). Une analyse *a posteriori* des données montre que les petites (D1) différences de distances sont traitées différemment des moyennes (D2 ; $p \sim 0$; Fig. 43), et des grandes (D3 ; $p \sim 0$; Fig. 43). En revanche, il n'apparaît pas de différence significative entre les moyennes (D2) et les grandes (D3) différences de distances (Fig. 43).

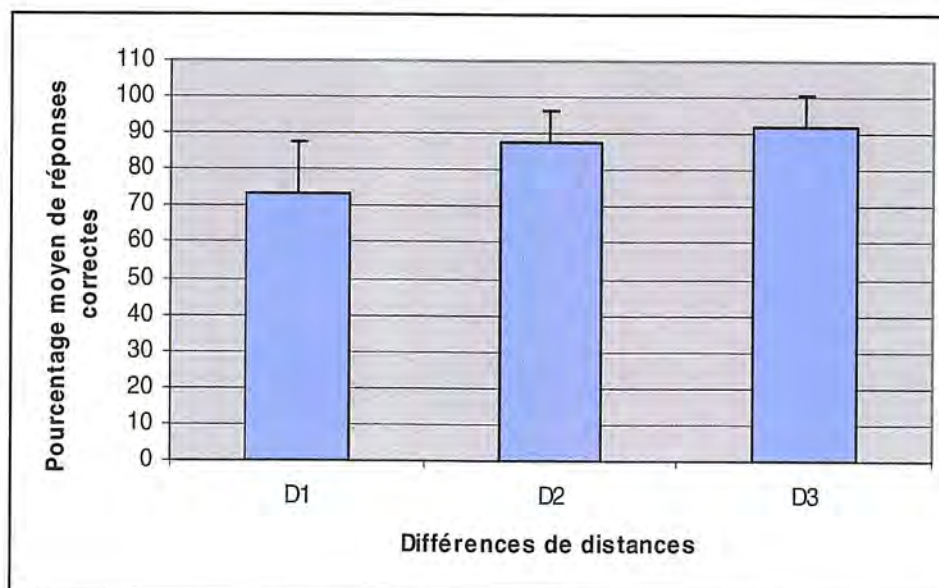


Figure 43: Pourcentage moyen de réponses correctes en fonction de la différence de distances (petite, moyenne, grande), indépendamment du groupe (vpv, nvt, nvn), et de la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration tactile).

Ainsi, plus la différence entre deux distances est grande et plus le pourcentage de réponses correctes est important et ceci, sans que soient distingués les groupes d'appartenance des participants ou les modalités d'acquisition de l'environnement. Néanmoins, les moyennes et grandes différences de distances ne sont pas traitées de façon différentes (Fig. 43).

8.2.3.1.1.4. Interaction des variables groupe et distance

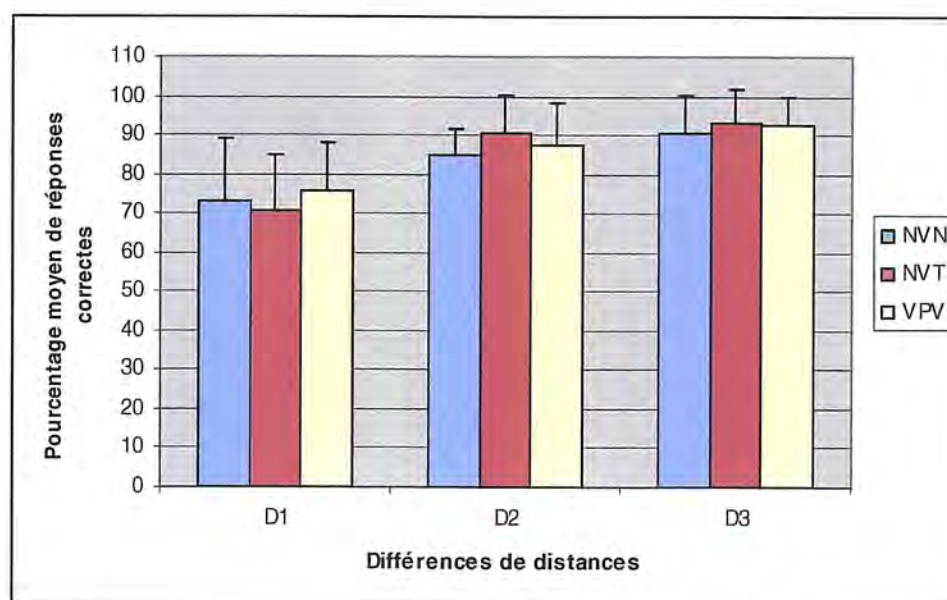


Figure 44: Pourcentage moyen de réponses correctes en fonction du groupe de participants (vpv, nvt, nvn), et de la différence de distances (petite, moyenne, grande), et indépendamment de la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration tactile).

L'analyse de variance ne révèle aucune interaction significative entre les facteurs groupe et distance, pour les pourcentages moyens de réponses correctes.

8.2.3.1.2. Variations des pourcentages de réponses correctes par groupe

Les analyses statistiques détaillées pour chacun des groupes confirment de manière générale les résultats décrits ci-dessus.

8.2.3.1.2.1. Effet de la modalité d'acquisition

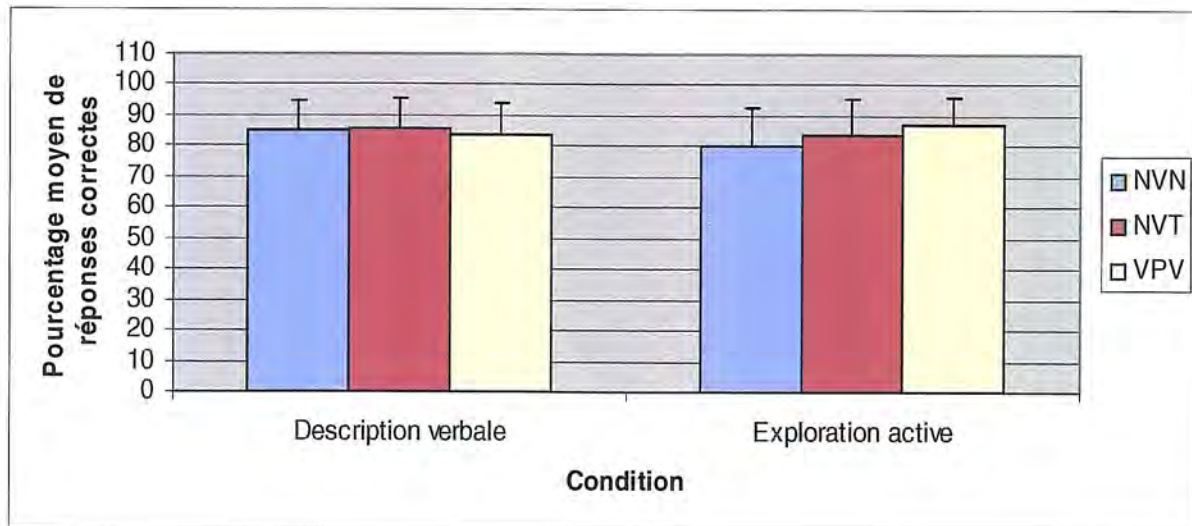


Figure 45: Pourcentage moyen de réponses correctes en fonction de la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration tactile), en fonction du groupe (vpv, nvt, nvv), et indépendamment de la différence de distances (petite, moyenne, grande).

La modalité d'acquisition de l'environnement audio 3D, par description verbale, ou exploration active n'a pas induit de modifications des pourcentages de réponses correctes quel que soit le groupe de participants, privés artificiellement de vision, non-voyants tardifs ou de naissance.

8.2.3.1.2.2. Effet des différences de distances

Nos résultats indiquent que le pourcentage de réponses correctes dépend de l'ampleur de la différence de distances traitées (D1, D2, D3) aussi bien chez les participants privés artificiellement de vision ($F(2, 30) = 12,133$; $p = 0,00014$; Fig. 46), que non-voyants tardifs ($F(2, 30) = 27,6$; $p \sim 0$; Fig. 46) ou non-voyants de naissance ($F(2, 28) = 8,2197$; $p = 0,0015$; Fig. 46).

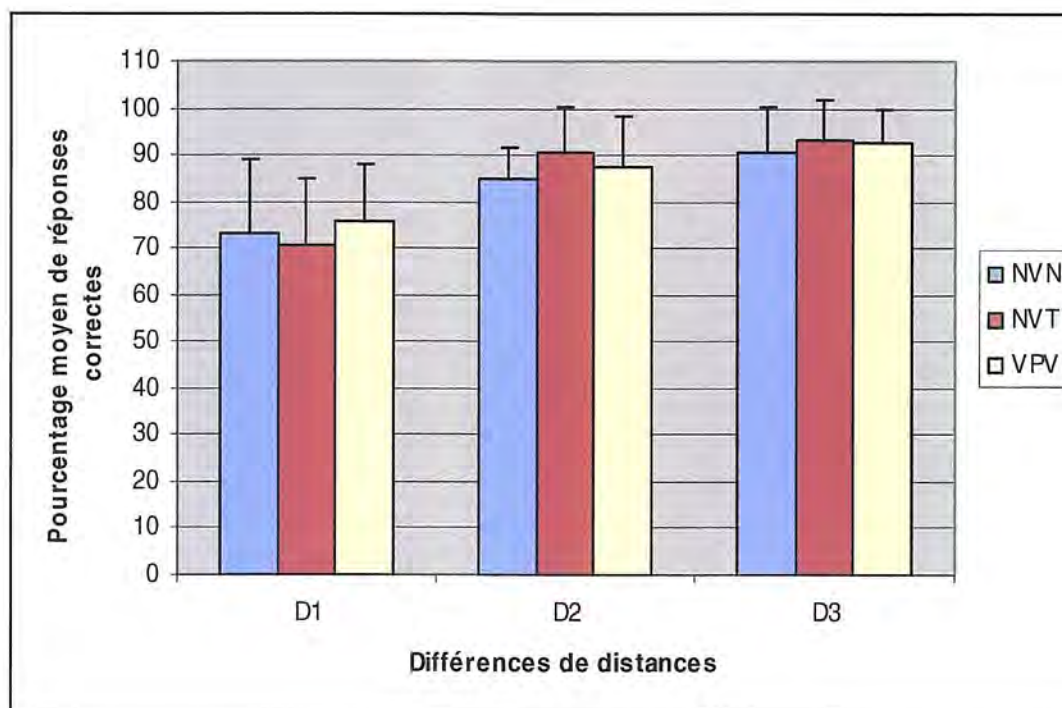


Figure 46: Pourcentage moyen de réponses correctes en fonction de la différence de distances (petite, moyenne, grande), et du groupe de participants (vpv, nvt, nvn), indépendamment de la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration tactile).

Les analyses *a posteriori*, révèlent que les participants vpv traitent de manière significativement différentes les petites (D1) et grandes (D3) différences de distances ($p < 0,000145$), ainsi que les petites (D1) et moyennes (D2) différences de distances ($p < 0,00756$). Il en est de même pour les participants non-voyants tardifs (D1 vs. D2, $p \sim 0$; D1 vs. D3, $p \sim 0$; Fig. 46) et non-voyants de naissance (D1 vs. D2, $p = 0,0276$; D1 vs. D3, $p = 0,0017$; Fig. 46). En revanche, la différence qui apparaît entre les pourcentages de réponses affectés aux moyennes (D2) et grandes (D3) différences de distances n'apparaît pas significative, quel que soit le groupe de participants considéré (Fig. 46).

8.2.3.1.2.3. Interaction des variables modalités et distances

L'analyse statistique confirme que la modalité d'acquisition de l'environnement ne facilite pas préférentiellement la comparaison mentale d'une différence de distances par rapport à l'autre, quel que soit le groupe de participants considéré (Fig. 47 pour les VPV, Fig. 48 pour les NVT, et Fig. 49 pour les NVN).

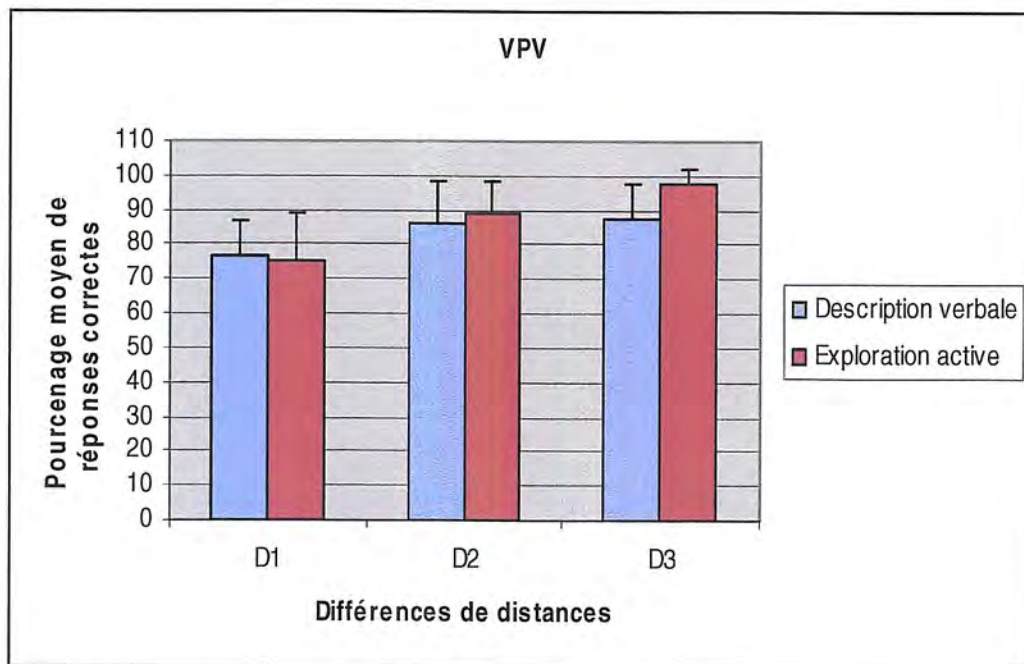


Figure 47: Pourcentage moyen de réponses correctes pour les voyants privés de vision, en fonction de la différence de distances (petite, moyenne, grande) et de la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration tactile).

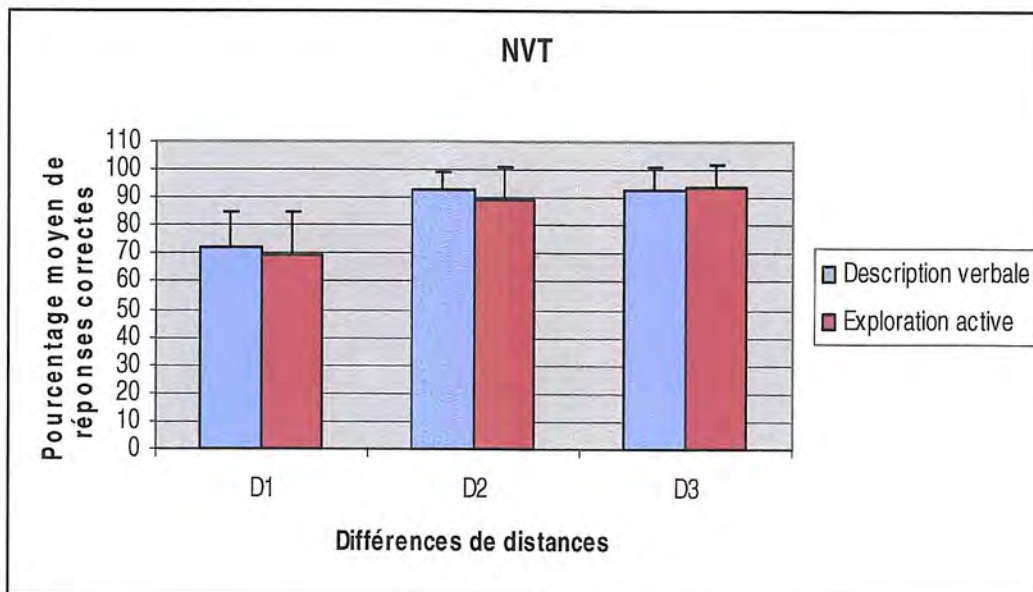


Figure 48: Pourcentage moyen de réponses correctes pour les non-voyants tardifs, en fonction de la différence de distances (petite, moyenne, grande) et de la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration tactile).

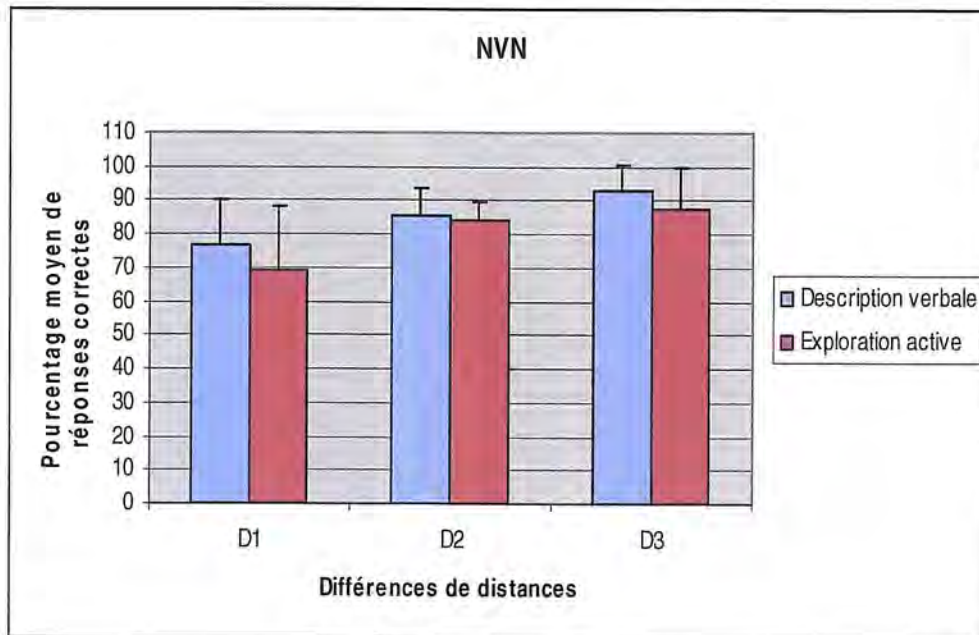


Figure 49: Pourcentage moyen de réponses correctes pour les non-voyants de naissance, en fonction de la différence de distances (petite, moyenne, grande) et de la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration tactile).

Nous avons procédé à l'analyse de chacun des types de distances (D1, D2, D3), et les résultats montrent clairement que ni le groupe auquel appartiennent les participants (vpv, nvt, nvn), ni la modalité d'acquisition de l'environnement (description verbale, exploration active) n'a d'influence sur les pourcentages de réponses correctes associés aux petites (D1), moyennes (D2) ou grandes (D3) différences de distances.

8.2.3.1.3. Résumé sur les pourcentages de réponses correctes issus de la tâche 4

Des données issues des pourcentages de réponses correctes nous montrons que la modalité d'acquisition de la configuration de l'environnement virtuel n'a pas une influence significative sur la capacité des participants à juger correctement entre deux distances, qu'ils aient appris la configuration de l'environnement grâce à une description verbale ou bien à son exploration active, et quel que soit le groupe auxquels ils appartiennent (vpv, nvt, nvn). Par ailleurs, plus la différence entre deux distances est grande et plus le pourcentage de réponses correctes est

élevé, sans que pour autant les pourcentages correspondant aux différences entre les moyennes (D2) et grandes (D3) distances apparaissent significativement distincts, et ceci, quel que soit le groupe auquel appartiennent les participants.

8.2.3.2. Analyse des temps de réponse

8.2.3.2.1. Chez l'ensemble des participants

8.2.3.2.1.1. Effet de la modalité d'acquisition

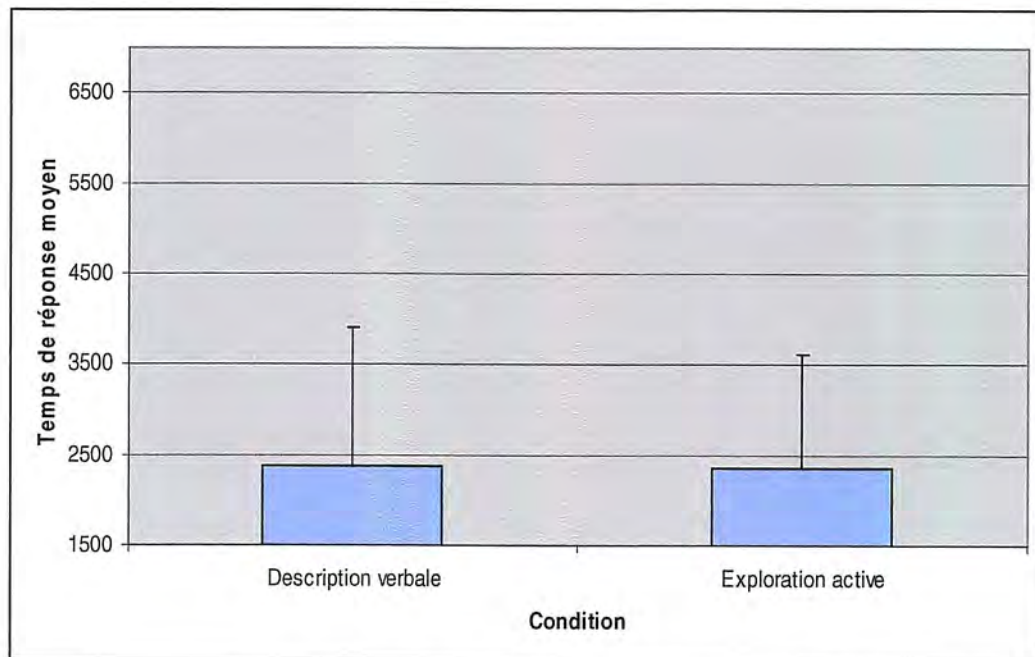


Figure 50: Temps de réponse moyen obtenu en fonction de la modalité d'acquisition de l'environnement (description verbale, exploration active), indépendamment du groupe (vpv, nvt, nvn), et de la différence de distances (petite, moyenne, grande).

Les données ne montrent pas de différences globales significatives entre les deux modalités d'acquisition utilisées dans cette expérimentation. Ainsi, quelle que soit la modalité d'acquisition de l'environnement, celle-ci n'induit pas d'effet différentiel sur les temps de réponse des participants (Fig. 50).

8.2.3.2.1.2. Effet de la variable groupe

Les résultats indiquent que le temps de réponses pour comparer mentalement les distances dans l'environnement audio 3D est similaire lorsque les trois groupes de participants sont considérés dans leur ensemble (vpv, nvn, nvt, Fig. 51).

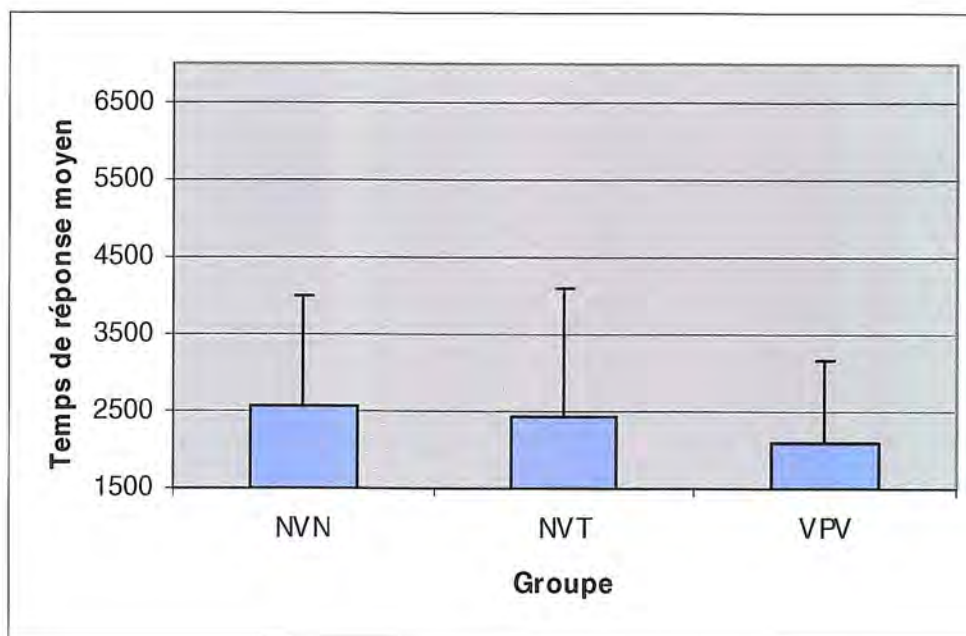


Figure 51: Temps de réponse moyen obtenu par les différents groupes (nvn, nvt, vpv), indépendamment de la modalité d'acquisition de l'environnement (description verbale, exploration active), et de la différence de distances (petite, moyenne, grande).

2.3.2.1.3. Effet de la variable distance

Les résultats montrent que les temps de réponse des réponses varie significativement en fonction des trois types de différences de distances à comparer mentalement ($F(2, 88) = 23,930$; $p \sim 0$; Fig. 52). L'analyse *a posteriori* de comparaisons deux à deux montre que le temps nécessite pour évaluer des distances dont les différences sont petites (D1) est significativement plus élevé que les moyennes (D2 ; $p \sim 0$), et les grandes (D3 ; $p \sim 0$). De manière équivalente, les participants prennent plus de temps pour comparer mentalement deux distances dont la différence est moyenne plutôt que grande ($p < 0,037$; Fig. 52).

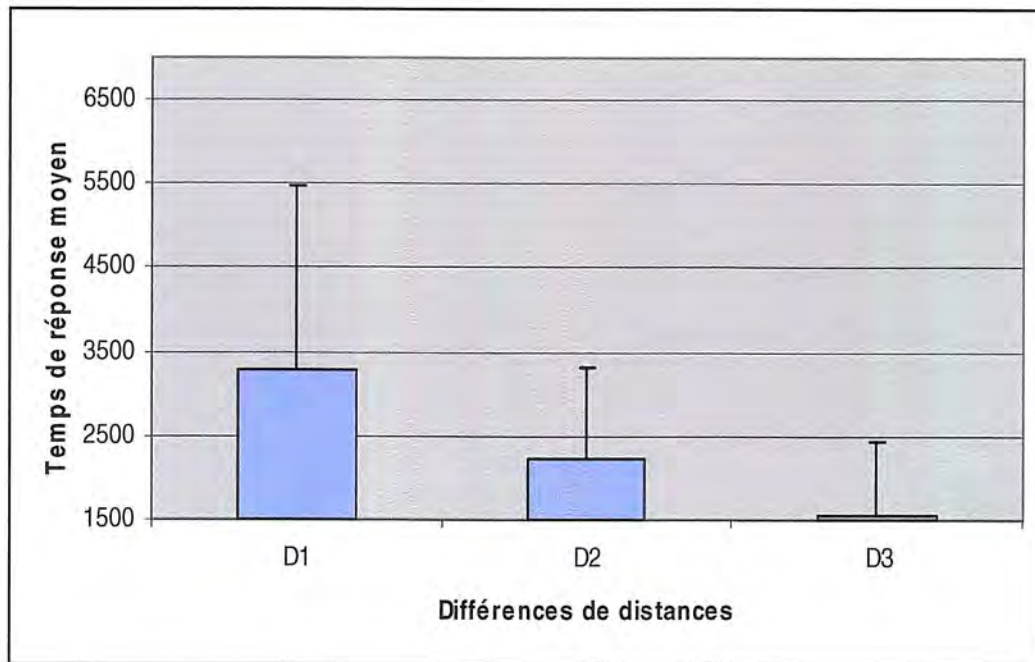


Figure 52: Temps de réponse moyen obtenu en fonction de la différence de distances (petite, moyenne, grande), indépendamment de la modalité d'acquisition de l'environnement (description verbale, exploration tactile), et du groupe expérimental (nvn, nvt, vpv).

8.2.3.2.1.4. Interaction des variables groupe et distance sur les temps de réponse

L'analyse de l'interaction groupe x distance, i.e. l'analyse de l'influence de l'expérience visuelle sur le temps nécessaire pour comparer mentalement des distances révèle une absence d'interaction significative.

Nous avons procédé à l'analyse de chacun des types de distances, et les résultats montrent clairement que ni le groupe auquel appartiennent les participants (vpv, nvt, nvn), ni la modalité d'acquisition de l'environnement (description verbale, exploration active) n'a d'influence sur les temps de réponse associée aux petites (D1), moyennes (D2) ou grandes (D3) différences de distances.

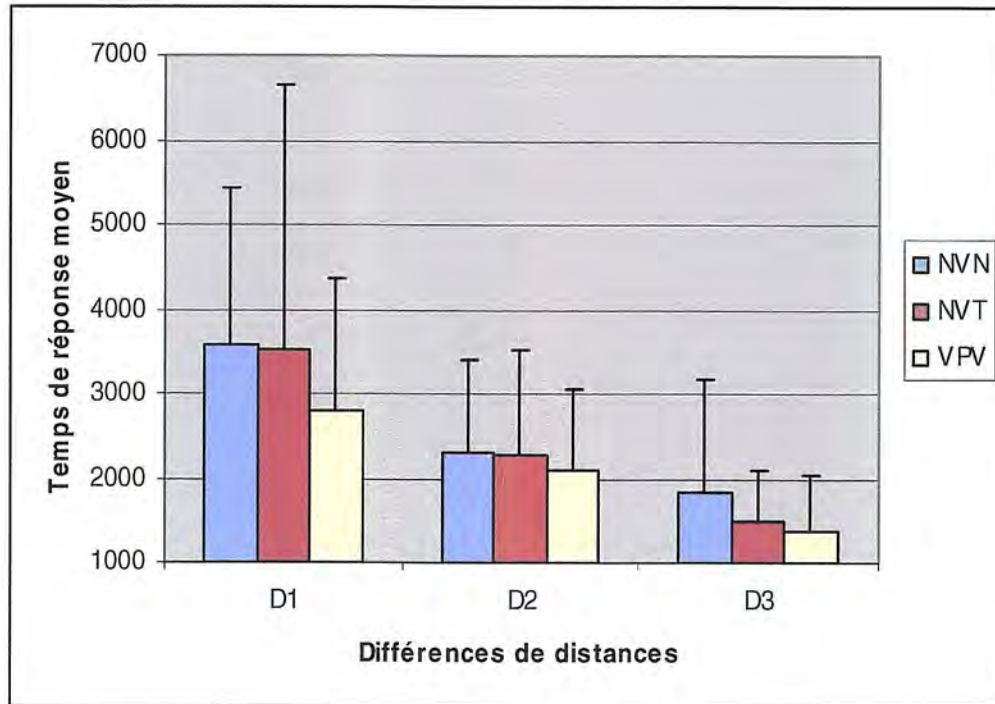


Figure 53: Temps de réponse moyen en fonction de la différence de distances (petite, moyenne, grande) et du groupe de participants (nvn, nvt, vpv), indépendamment de la modalité d'acquisition de l'environnement (description verbale, exploration active).

En résumé, le temps de comparaison mentale de distances des participants, sans distinguer leur caractéristique visuelle ou la modalité d'acquisition de l'environnement, est d'autant plus court que la différence entre deux distances est grande. Autrement dit, plus la différence entre deux distances est grande, plus le temps requis pour exécuter la tâche mentale de comparaison est court.

8.2.3.2.2. Variations des temps de réponses par groupes

8.2.3.2.2.1. Effet de la modalité d'acquisition

La modalité d'acquisition de l'environnement audio 3D par description verbale ou exploration active n'a pas induit de modifications significatives dans les temps de réponse des participants, quel que soit le groupe auquel ils appartiennent (VPV, NVT, NVN).

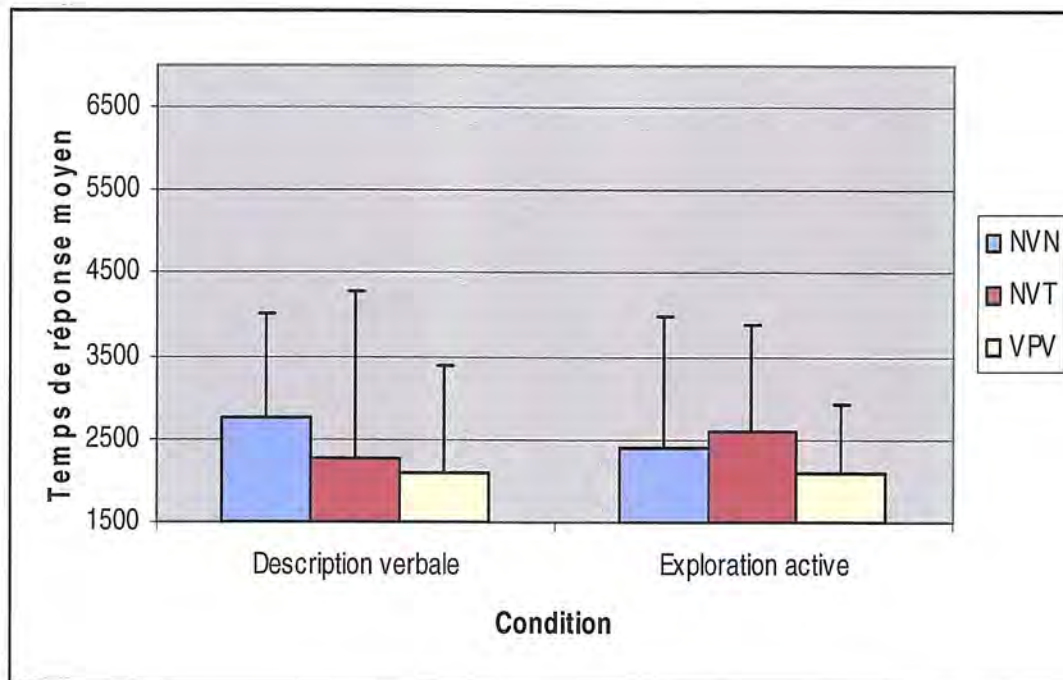


Figure 54: Temps de réponse moyen en fonction de la modalité d'acquisition de l'environnement (description verbale, exploration active), et du groupe de participants (vpv, nvt, nvn), indépendamment de la différence de distances (petite, moyenne, grande).

8.2.3.2.2.2. Effet des différences de distances

Nos résultats montrent que les temps de réponse dépendent de l'ampleur de la différence de distances à traiter (D1, D2, D3) aussi bien chez les participants privés artificiellement de vision ($F(2, 30) = 8,7646$; $p < 0,001$; Fig. 55), que chez les non-voyants tardifs ($F(2,30) = 6,3581$; $p < 0,005$; Fig. 55). ou chez les non-voyants de naissance ($F(2, 28) = 13,557$; $p = 0,00008$; Fig. 55).

Les analyses *a posteriori*, révèlent que les participants vpv traitent de manière significativement différentes les petites (D1) et grandes (D3) différences de distances ($p < 0,0012$). Il en est de même pour les participants non-voyants tardifs (D1 vs. D3, $p < 0,0054$) et non-voyants de naissance (D1 vs. D3, $p < 0,0002$). Une autre différence significative existe entre les temps de réponses associés à D1 et D2 chez les non-voyants de naissance (D1 vs D2, $p = 0,0057$). Ainsi, les données issues des temps de réponses suggèrent que les moyennes différences de distances (D2) ne sont pas différenciables des petites (D1) et grandes (D3)

différences de distances pour les 3 groupes de participants, excepté pour les non-voyants de naissance qui ne dissocie pas uniquement les moyennes (D2) et grandes (D3) différences de distances.

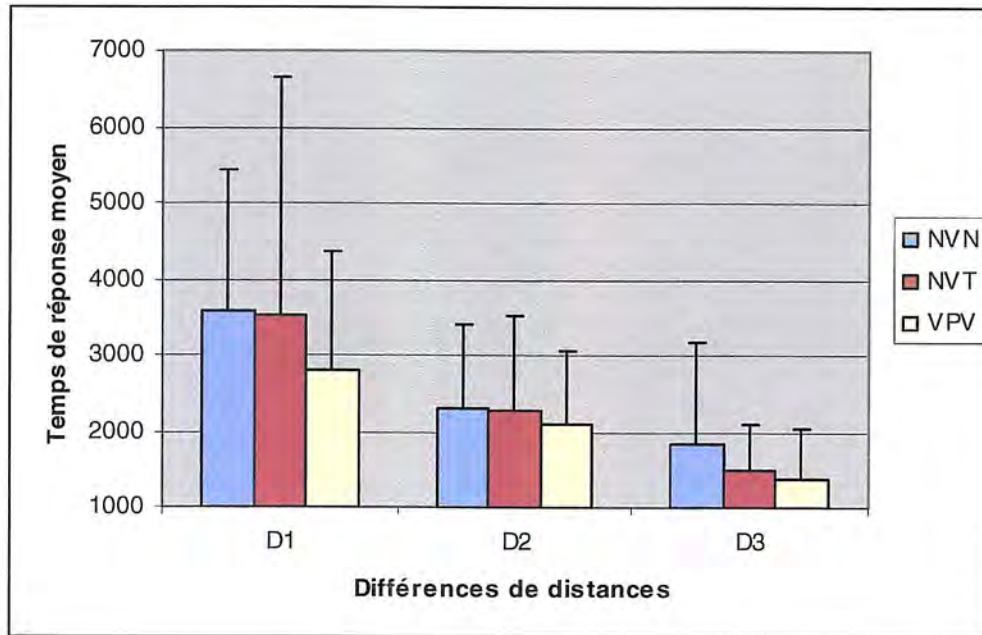


Figure 55: Temps de réponse moyen en fonction de la différence de distances (petite, moyenne, grande), et du groupe (vpv, nvt, nvn), indépendamment de la modalité d'acquisition de l'environnement (description verbale, exploration active).

8.2.3.2.2.3. Interaction des variables modalités et distances

L'analyse statistique confirme qu'une modalité d'acquisition (par description verbale ou exploration active) de l'environnement n'influe pas sur les temps de réponse mesurés dans la tâche de comparaison mentale de distances, et ceci quel que soit le groupe de participants considéré.

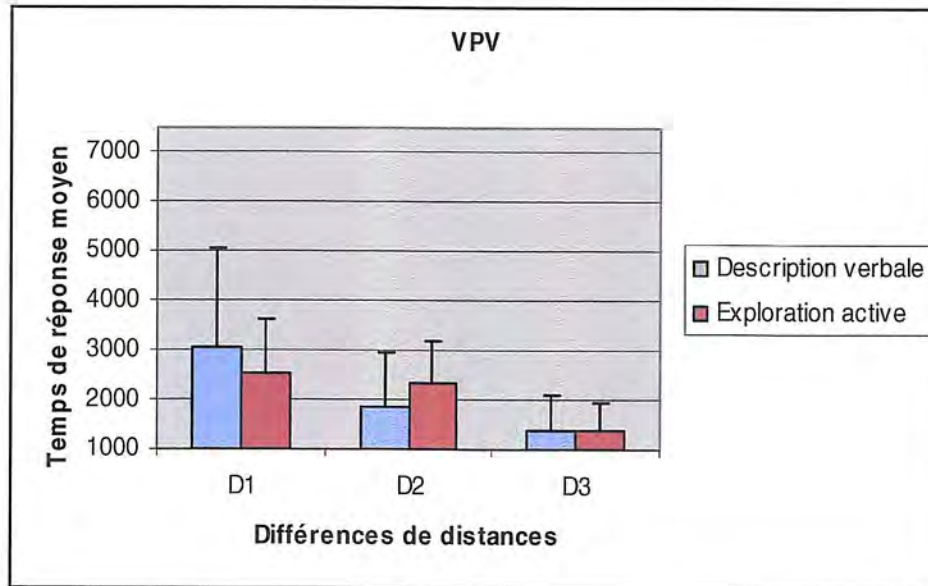


Figure 56: Temps de réponse moyen pour les voyants privés de vision, en fonction de la différence de distances (petite, moyenne, grande) et de la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration tactile).

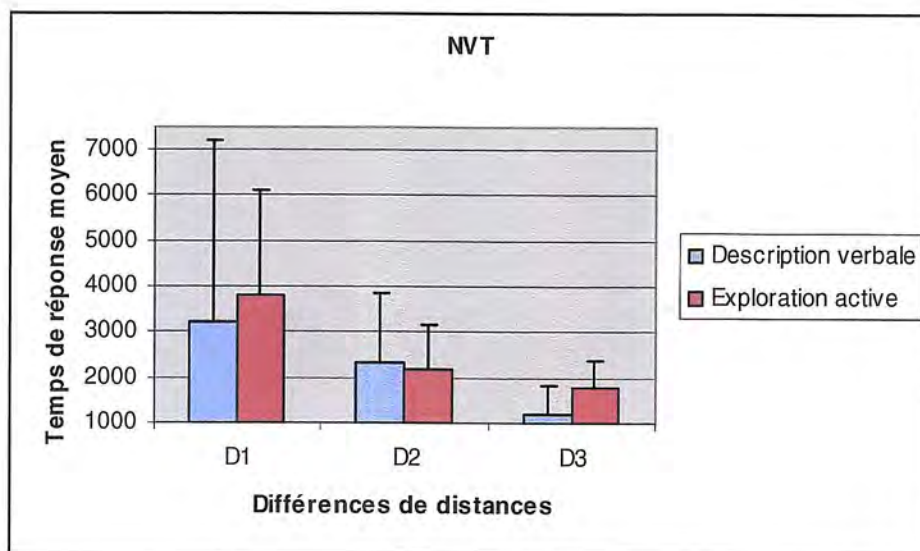


Figure 57: Temps de réponse moyen pour les non-voyants tardifs, en fonction de la différence de distances (petite, moyenne, grande) et de la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration tactile).

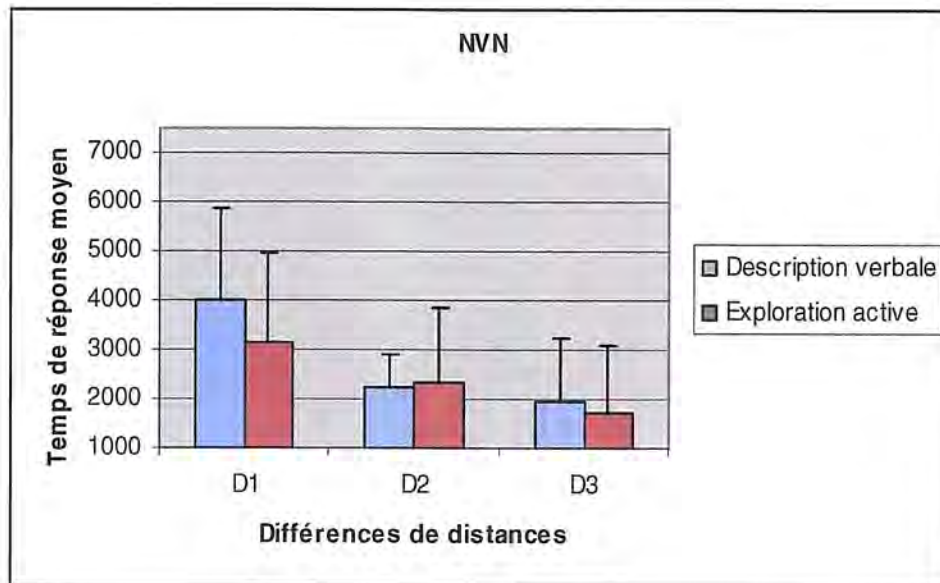


Figure 58: Temps de réponse moyen pour les non-voyants de naissance, en fonction de la différence de distances (petite, moyenne, grande) et de la modalité d'acquisition de la configuration (description verbale, exploration tactile).

Nous avons procédé à l'analyse de chacun des types de distances (D1, D2, D3), et les résultats montrent clairement que ni le groupe auquel appartiennent les participants (vpv, nvt, nvN), ni la modalité d'acquisition de l'environnement (description verbale, exploration active) n'a d'influence sur les temps de réponses associés aux petites (D1), moyennes (D2) ou grandes (D3) différences de distances.

8.2.3.2.5. Résumé sur les temps de réponses issus de la tâche 4

En résumé, les résultats issus de l'analyse des temps de réponse montrent que la condition d'apprentissage, dans le cas d'une immersion dans un monde virtuel audio 3D, n'a pas d'influence significative sur les temps de réponse, qu'il s'agisse de la description verbale de cet environnement, ou bien de son exploration active, et ceci, que les participants soient privés temporairement (vpv) ou bien définitivement de vision (nvt, nvN). Par ailleurs, les résultats montrent pour l'ensemble des participants, que le temps requis pour comparer deux distances est d'autant plus long que la différence entre les deux distances est petite plutôt que moyenne ou grande.

8.3. Discussion (*expérience 3*)

Dans cette *expérience 3*, nous avons tout d'abord évalué la capacité des participants à reconstruire la configuration de l'environnement qu'ils venaient d'apprendre (tâche 1). Nous avons observé quelle influence pouvait avoir, sur la précision de reconstruction, la condition d'apprentissage à laquelle ils avaient été soumis, mais aussi le groupe auquel ils appartenaient: voyants privés temporairement de vision, non-voyants tardifs et non-voyants de naissance.

Les données montrent clairement que quelle que soit l'expérience visuelle des participants, dès lors qu'un environnement à taille réelle leur est décrit verbalement, ces derniers sous-estiment systématiquement sa taille.

En revanche, les données montrent que les participants voyants privés de vision qui ont pu explorer physiquement la configuration de l'espace durant la phase d'apprentissage, sont capables de repositionner de manière très précise les sources sonores sur la périphérie du cercle, avec une moyenne de 16° de variation angulaire (équivalente à celle des non-voyants tardifs, mais significativement plus faible que celle des non-voyants de naissance).

Ces résultats suggèrent donc que l'exploration active d'un environnement est bénéfique aux personnes voyantes privées temporairement de vision, pour leur permettre de se créer une représentation de l'espace dans lequel elles ont été immergées, qui conserve sa taille initiale. En revanche, dès lors qu'un individu est privé définitivement de la vue, quelle que soit la condition d'apprentissage, il a tendance à se représenter les environnements de grande taille (diamètre de 3 m), plus petits qu'ils ne le sont dans la réalité.

Les données issues de l'analyse des erreurs de positionnement en distance absolue montrent une supériorité des performances issues de l'apprentissage de la configuration par exploration active plutôt qu'à la suite d'une description verbale, et ceci, pour les trois groupes de participants.

Ces données sont en accord avec différentes études menées dans des environnements virtuels, qui ont permis de mettre en évidence, sur l'acquisition de connaissances spatiales, la supériorité d'une exploration active sur une exploration passive (Carassa, Ceminiani, Morganti et Bussolon, 2000 ; Péruch, Vercher et Gauthier, 1995). L'ensemble des études ne convergent néanmoins pas systématiquement (Arthur, 1996, Christou et Bühlhoff, 1999 ; Gaunet, Vidal, Kemeny et Berthoz, 2001 ; Wilson, Foreman, Gillett et Stanton, 1997 ; Wilson, 1999).

En d'autres termes, nos données montrent que les participants voyants privés temporairement de vision bénéficie d'une exploration active pour apprendre la configuration d'un environnement, par rapport à une description verbale, contrairement aux personnes non-voyantes (de naissance ou tardive) qui n'en tirent pas de bénéfice mesurable. Ensuite, nos résultats montrent qu'une description verbale, quel que soit le statut de l'expérience visuelle du participant (privé temporairement ou définitivement de vision) induit une représentation de l'environnement mémorisé plus petite qu'il ne l'est dans la réalité.

Enfin, nos résultats montrent que seuls les participants non-voyants de naissance font significativement plus d'erreurs de positionnement angulaire que les participants non-voyants tardifs d'une part, ou voyants privés temporairement de vision d'autre part.

Dans cette tâche, les participants étaient délibérément amenés à reconstruire l'environnement initial à partir d'un autre point de référence. Alors que dans la phase d'apprentissage, ils se trouvaient au centre du cercle virtuel, dans la phase de reconstruction (sauf pour le premier positionnement), les participants avaient pour point de départ, la chaise au fond de la salle, à partir de laquelle ils allaient devoir repositionner les différents objets sonores.

Au-delà des erreurs de positionnement de rayon et en distance absolue qui ont sensiblement été identiques entre les différents groupes, seuls les participants non-voyants de naissance ont significativement déplacé les objets sonores sur la périphérie du cercle (un objet qui aurait dû se trouver à 11h, serait placé à 10h ou à 13h, par exemple).

Ces résultats vont dans le sens des travaux de Gaunet et Thinus-Blanc (1996), et de Gaunet et ses collaborateurs (1997) qui montrent que dès lors que des changements sont apportés à des configurations initialement apprises par des participants non-voyants de naissance, les modifications d'ordre métrique (déplacement d'un objet en centimètres) étaient significativement moins bien détectés par eux que par des participants non-voyants tardifs ou voyants privés de vision. En revanche, tout comme les autres participants, les non-voyants de naissance détectaient sans difficultés les modifications d'ordre topologique. Nous pouvons imaginer que si ce ne sont plus les objets qui sont déplacés, mais le corps même de l'individu non-voyant de naissance, cela peut avoir les mêmes conséquences sur sa perception de l'environnement. A savoir qu'il sera tout à fait à même de replacer les objets sonores dans une position respectant la topologie de l'environnement initial, mais qu'en revanche, les positionnements relatifs à leur emplacement sur la périphérie du cercle virtuel sont moins précis.

Dans un second temps, nous avons de nouveau soumis les participants aux tâches d'exploration mentale de distances, ainsi que de comparaison mentale de distances. Nous

avons voulu tester dans quelle mesure la taille de l'environnement, ainsi qu'une exploration active de l'environnement pouvait avoir une influence sur les propriétés métriques des représentations mentales des participants, inférées à partir de l'apprentissage de l'environnement par immersion dans un monde virtuel en audio 3D.

Grâce à la tâche d'exploration mentale de distances (tâche 3), nous avons montré que dans le cas d'un apprentissage par description verbale, l'ensemble des participants, aussi bien voyants privés de vision que non-voyants tardifs ou de naissance, faisait apparaître une corrélation entre les temps de parcours mentaux et les distances à parcourir, qui était positive et significative. Ainsi, plus la distance entre deux sources sonores était grande, et plus le temps de parcours lui étant associé était allongé, tout comme dans les études princeps desquelles nous nous sommes inspirés (Kosslyn et al. 1978 ; Denis et Cocude, 1992). Ces données suggèrent que dans le cas d'une immersion dans un environnement de taille réelle, l'expérience visuelle de l'individu n'affecte pas sa représentation mentale de la configuration, qui préserve les relations métriques entretenues entre les différentes sources sonores présentes, dès lors que cette environnement est venu à sa connaissance par description verbale. Notons néanmoins que les personnes dépourvues d'expérience visuelle précoce obtiennent des coefficients de corrélation plus faibles que les non-voyants tardifs et voyants privés de vision.

En revanche, les résultats obtenus dans la condition par exploration active montre que chez les participants non-voyants de naissance, la corrélation entre les distances et les temps de parcours mentaux, bien que positive, n'atteint pas le seuil de significativité. Nous pouvons faire à ce sujet l'hypothèse de l'effectif trop faible de nos groupes expérimentaux. En effet, la valeur du r étant de .69 à la suite de la description verbale, et de .63, après exploration active de l'environnement, s'avère être dans le premier cas significative, alors que dans le second elle ne l'est plus. La dispersion des points laisse donc supposer que dans le cas d'un effectif plus important, la corrélation aurait été ici significative.

Enfin, le résultat de cette tâche 3 qui est le plus surprenant est celui obtenu par le groupe des participants voyants privés temporairement de vision, après un apprentissage de la configuration par exploration active. En effet, dans ce cas précis, si ces individus sont soumis à une tâche d'exploration mentale de distance, nous ne retrouvons pas la corrélation classiquement obtenue dans cette population entre une distance et son temps de parcours mental. Ces résultats suggèrent que l'acquisition de l'environnement par une exploration active pour les personnes voyantes privées de vision perturbe la mise en place d'une

représentation mentale de l'environnement qui permette de réaliser des déplacements mentaux entre les différents éléments qui y sont présents.

En revanche, les données que nous avons obtenues grâce à la tâche de comparaison mentale de distances nous informe que quelle que soit la modalité d'apprentissage de l'environnement dans lequel ils ont été immergés, les individus sont capables de juger correctement de la longueur de deux distances, et ceci indépendamment de l'expérience visuelle dont ils ont pu ou non bénéficier. Nous avons en effet obtenu des pourcentages de réponses correctes d'autant plus importants que la différence entre deux distances était grande, et ceci chez tous les groupes de participants. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus dans la littérature précédemment (Denis et Zimmer, 1992).

Nous avons aussi comparé les données issues de l'analyse des différences entre deux distances, et il s'avère que pour chaque différence (petite, moyenne ou grande), les participants font plus d'erreurs et mettent plus de temps pour juger des différences dans le cas des petites différences de distances, que des moyennes ou des grandes. Les données issues des temps de réponse montrent aussi les mêmes résultats que ceux obtenus dans la littérature sur des configurations plus petites, à savoir que les petites différences de distances engendrent des temps de réponse supérieur aux moyennes et grandes différences de distances (Denis et Zimmer, 1992).

Notons cependant que dans ces deux dernières expérimentations, nous avons proposé aux participants une version raccourcie des expériences. De ce fait, nous pouvons supposer que le fait que les moyennes différences de distances ne se distinguent pas significativement des petites et grandes différences de distances pour les participants voyants privés de vision et non-voyants tardifs, ou simplement des grandes pour les non-voyants de naissance, soit principalement la conséquence d'un moindre nombre de comparaisons à opérer.

En conclusion de cette *expérience 3*, nous montrons que nous obtenons à partir de la description verbale de la configuration d'un environnement de grande taille (3 m de diamètre), généré virtuellement en audio 3D, les mêmes résultats que ceux obtenus dans la littérature dans des tâches d'exploration mentale et de comparaison mentales de distances, à partir de petites configurations (50 cm ; Denis et Cocude, 1992 ; Denis et Zimmer, 1992). En effet, plus la différence entre deux éléments est grande, et plus le temps de parcours mental est long. De la même manière, plus l'ampleur de la différence entre deux distances est grande, et plus les pourcentages de réponses correctes sont importants, et les temps de réponse courts. Par

ailleurs, nos résultats indiquent clairement que dans cette condition, les participants sous-estiment systématiquement la taille de l'environnement qui leur a été décrit, dès lors qu'ils doivent le reconstruire.

Dans le cas d'une exploration active de l'environnement, nous retrouvons les mêmes conclusions pour les individus non-voyants de naissance ou tardifs.

Pour les individus voyants privés de vision, l'exploration active de l'environnement virtuel audio leur permet de se représenter mentalement la configuration de l'environnement, en préservant ses relations métriques et topologiques (les pourcentages de réponses correctes étant très élevés). En revanche, cette condition d'apprentissage affecte considérablement leur capacité à explorer mentalement des distances entre les éléments composant cet environnement.

Ce résultat est d'autant plus intéressant que nous avons pu mettre en évidence que dans cette même condition, ces mêmes participants étaient les seuls à repositionner exactement, à partir de la représentation mentale qu'ils avaient générée de l'environnement, les différentes sources sonores sur la périphérie du cercle virtuel.

Ces résultats suggèrent que les processus impliqués dans les tâches d'exploration mentale de distance, et de comparaison mentale de distances, même s'ils sont de nature à nous informer tous deux sur la préservation des qualités métriques des représentations mentales, font appel à des mécanismes différents qui peuvent être affectés ou non, selon la condition d'apprentissage.

Enfin, nous avons pu mettre en évidence grâce à cette expérimentation, que le traitement des petites différences de distances n'était plus spécifiquement affecté chez les participants non-voyants de naissance. Ceci soutient notre hypothèse selon laquelle ces participants auraient des difficultés spécifiques à traiter les informations métriques fines au sein de petits environnements.

CHAPITRE 9

Analyse comparative des expériences 1, 2 et 3

Dans ce chapitre, nous proposons de comparer les données issues des expériences 1 et 2, respectivement d'exploration mentale de distances, et de comparaison mentale de distance, proposée à partir de l'apprentissage d'une configuration de petite taille (diamètre de 50 cm), avec ces mêmes expériences proposées dans l'expérience 3, cette fois issues de l'apprentissage d'un environnement de grande taille générée virtuellement (diamètre de 3m).

9.1. Exploration mentale de distances

Afin de pouvoir comparer les échantillons de ces deux expériences, nous avons tout d'abord supprimé les valeurs associées à une distance dans l'expérience 1, afin de n'avoir dans chacune des deux expériences que 9 trajets à traiter. Pour constituer la version courte de la tâche d'exploration mentale de distance, nous n'avions en effet proposé que 9 trajets ou chaque distance n'était évaluée qu'une seule fois.

9.1.1. Analyse globale

Nous avons tout d'abord cherché à comparer globalement, indépendamment des groupes et des modalités d'apprentissage, si les temps de traitement associés aux explorations mentales de distances, différaient selon que l'environnement initial était petit ou de grande taille.

Les analyses de variance ne montrent aucune différence significative entre les temps de réponse associés à l'apprentissage de la configuration de 50 cm et celui de l'environnement de 3 m. Ainsi, que les participants apprennent la configuration d'un environnement de petite taille ou de grande taille, les temps d'exploration mentale sont équivalents dans les deux cas.

9.1.2. Comparaison par modalités d'apprentissage

Une analyse comparative des données issues de l'apprentissage par description verbale au sein des deux expériences indique qu'il n'existe aucune différence significative au sein des temps de réponse entre les données issues de l'apprentissage de la configuration de 50 cm et celui de l'environnement de 3 m.

De la même manière, nous avons considéré que l'apprentissage par exploration tactile d'une configuration de petite taille correspondait (au moins en partie) à l'exploration active de l'environnement virtuel. Les données montrent clairement qu'aucune différence significative n'émerge entre les deux expériences sur les temps de réponse.

Ainsi, quelle que soit la taille de l'environnement initial appris par le participant, les temps de réponse associés à un apprentissage par description verbale d'une part, ou par exploration tactile/active d'autre part, ne diffèrent pas significativement.

9.1.3. Comparaison par groupes

Nous avons cherché à savoir, si, au sein de chaque groupe, une différence dans les temps de réponse serait observée en fonction de la taille de l'environnement initial, et de la modalité d'apprentissage grâce à laquelle cet environnement avait été appris.

En ce qui concerne les données obtenues à la suite d'une description verbale, par les participants voyants privés de vision et non-voyants tardifs, aucune différence significative n'apparaît sur les temps d'exploration mentale associés aux configurations de petite taille d'une part, ou à l'environnement de grande taille d'autre part.

En revanche, dans le cas des personnes non-voyantes de naissance, l'analyse de variance montre clairement que les temps de réponses sont plus long dans l'expérience 1 (petite configuration) que dans l'expérience 3 (configuration de grande taille), $F(1,17) = 4,05$; $p = 0,05$.

Dans le cas des conditions par exploration tactile / active de la configuration ou de l'environnement, l'analyse de variance ne montre aucune différence significative entre les deux expériences, pour aucun des trois groupes (voyants privés de vision, non-voyants tardifs et non-voyants de naissance).

9.1.4. Résumé

En résumé, à partir des données issues de l'analyse comparative des expériences 1 et 3, en exploration mentale de distances, nous montrons que l'environnement ou la configuration à partir de laquelle l'individu doit se créer une représentation n'a pas, globalement, d'influence significative sur les temps de réponse. Autrement dit, la taille initiale de l'environnement n'influe pas sur les temps d'exploration mentale de distance, à partir du moment où ce dernier est décrit verbalement ou exploré tactilement / activement par des individus, qu'ils soient voyants privés de vision ou non-voyants tardifs.

Si une personne est dépourvue d'expérience visuelle précoce, aucune différence n'apparaît dans les temps de réponse issus d'un apprentissage par exploration tactile / active. En revanche, dans le cas d'une description verbale de l'environnement initial, les participants non-voyants de naissance nécessitent un temps significativement plus important pour explorer mentalement les distances issues de la configuration de petite taille que pour explorer celles issues de l'exploration de l'environnement de grande taille.

9.2. Comparaison mentale de distances

9.2.1 Pourcentage de réponses correctes

9.2.1.1. Analyse globale

Nous avons soumis les résultats issus des pourcentages de réponses correctes des deux expériences à une analyse de variance. Les résultats montrent que les pourcentages de réponses correctes issus de l'expérience menée à partir de l'apprentissage de la configuration de petite taille, indépendamment du groupe et de la modalité d'apprentissage, sont significativement meilleur que ceux issus de l'environnement de grande taille ($F(1,120) = 4,63$; $p = 0,033$).

9.2.1.2. Comparaison par modalités d'apprentissage

L'analyse de variance sur les modalités d'apprentissage montre un effet en tendance dans les conditions par description verbale, ($F(1,57) = 3,258$; $p = 0,076$). L'apprentissage par description verbale d'une configuration de petite taille engendre de meilleurs pourcentages de réponses correctes que celui d'un environnement de grande taille.

En revanche, dans le cas d'un apprentissage par exploration tactile / active, les données ne montrent aucune différence significative.

9.2.1.3. Comparaison par groupes

Tout d'abord dans le cas d'un apprentissage par description verbale, l'analyse de variance des pourcentages de réponses correctes obtenus par les participants voyants privés temporairement de vision montre un effet en tendance entre les expériences 2 (configuration de petite taille) et 3 (environnement de grande taille).

Les participants vpv obtiennent de meilleurs pourcentages de réponses correctes à partir de l'apprentissage d'une petite configuration qu'à partir d'un environnement de grande taille ($F(1,18) = 3,223$; $p = 0,089$).

Pour les participants non-voyants tardifs et non-voyants de naissances en revanche, aucune différence de pourcentage de réponses correctes n'apparaît entre les deux expériences, dans le cas d'un apprentissage par description verbale.

Dans le cas où l'apprentissage était proposé sous les conditions par exploration tactile / active, l'analyse de variance ne montre aucune différence significative entre les deux expériences, pour aucun des trois groupes (voyants privés de vision, non-voyants tardifs et non-voyants de naissance).

9.2.1.4. Résumé

En résumé, les données issues de l'analyse des pourcentages de réponses correctes, dans les expériences 2 (configuration de petite taille) et expérience 3 (environnement de grande taille) montrent un effet global selon lequel les pourcentages de réponses correctes sont meilleurs à la suite de l'apprentissage d'une petite configuration, par rapport à un environnement de grande taille. Cet effet s'observe uniquement dans le cas où l'apprentissage se fait par description verbale, et seule une tendance a pu être observée au sein du groupe des participants voyants privés temporairement de vision.

9.3. Temps de réponses

9.3.1. Analyse globale

Nous avons soumis les résultats issus des temps de réponse des expériences 2 (configuration de petite taille) et 3 (environnement de grande taille) à une analyse de variance. Les résultats montrent que les temps de réponses sont significativement plus longs dans le cas de l'apprentissage de la configuration de petite taille que dans celui de l'environnement de grande taille ($F(1,120) = 14,36 ; p \sim 0$).

9.3.2. Comparaison par modalités d'apprentissage

L'analyse de variance sur les modalités d'apprentissage, indépendamment du groupe, montre un effet significatif aussi bien après un apprentissage par description verbale ($F(1,58) = 7,011$; $p \sim 0,01$), qu'à la suite d'une exploration tactile / active ($F(1,61) = 6,926$; $p = 0,011$), de la taille de l'environnement initial.

Ainsi, quelle que soit la modalité d'acquisition de l'environnement, les temps de réponse associés à l'exploration mentale de distance de l'expérience issu de l'apprentissage de la configuration de petite taille sont significativement plus long que ceux issus de l'apprentissage de l'environnement de grande taille.

9.3.3. Comparaison par groupes

Dans le cas des apprentissages par description verbale, l'analyse de variance ne montre pas d'effet significatif dans les temps de réponses pour aucun des trois groupes de participants (voyants privés temporairement de vision, non-voyants tardifs et non-voyants de naissance) entre les expériences 2 et 3 de comparaison de distances.

Dans le cas des apprentissages par exploration tactile / active, seul les non-voyants de naissance mettent plus de temps à comparer des distances suite à l'apprentissage d'une petite configuration qu'a la suite de l'apprentissage d'une configuration de grande taille ($F(1,19) = 4,799$; $p = 0,041$).

9.3.4. Résumé

Les données issues des temps de réponse obtenus dans la tâche de comparaison mentale de distances montrent une différence significative entre les deux expériences. En effet, qu'il s'agisse d'un apprentissage par description verbale, ou bien par exploration tactile / active, les participants mettent plus de temps pour décider entre deux distances laquelle est la plus grande, dans le cas où la configuration initiale est petite (50 cm, expérience 2) plutôt que grande (3 m, expérience 3).

Cet effet ne se retrouve significativement que dans le cas des personnes non-voyantes de naissance, après une exploration tactile / active de la configuration à mémoriser. Ainsi,

pour une personne dépourvue d'expérience visuelle précoce, les temps de réponse sont d'autant plus courts, que la personne a bénéficié d'une exploration active au sein d'un environnement de grande taille plutôt que dans le cas de l'exploration tactile d'une configuration de petite taille.

Discussion Générale

Chapitre 10

Discussion générale et perspectives

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons soumis des participants voyants - privés temporairement ou non de vision - et des participants non-voyants - de naissance ou tardifs - à deux paradigmes permettant d'étudier les propriétés des représentations mentales de l'espace. Nous avons par ailleurs fait varier la condition d'apprentissage de la configuration à mémoriser, soit par une description verbale, soit par une exploration tactile (dans le cas des *expériences 1 et 2*), soit par une exploration active de l'environnement (*expérience 3*). Enfin, nous avons comparé l'influence de la taille de l'environnement initial sur les performances des participants (configuration de petite taille, environnement de grande taille).

Les différents degrés de privation visuelle

- Les participants voyants

Les résultats que nous avons obtenus grâce aux paradigmes d'exploration mentale et de comparaison mentale de distances auprès des personnes voyantes, soumises à l'apprentissage d'une configuration de petite taille, nous ont tout d'abord permis de nous assurer de la validité de notre protocole expérimental. En effet, qu'il s'agisse des coefficients de corrélation de *l'expérience 1* ou des pourcentages de réponses correctes et temps de réponse de *l'expérience 2*, les résultats montrent que les participants voyants (privés temporairement de vision, et gardant les yeux ouverts, pris ensemble) obtiennent des résultats similaires à ceux issus des expériences princeps (respectivement Denis et Cocude (1992) et Denis et Zimmer (1992)). Nous avons donc pu soumettre l'ensemble de nos participants voyants et non-voyants aux différentes tâches expérimentales.

Ainsi, dès lors que les participants voyants privés de vision sont soumis à l'apprentissage de la configuration d'un environnement de grande taille, les résultats sont sensiblement différents de ceux obtenus après l'apprentissage d'une configuration de petite taille. En effet, dans la tâche de comparaison mentale de distances, les pourcentages de

réponses correctes révèlent que les participants voyants privés de vision construisent une représentation mentale correcte de l'environnement (préservation de la topologie et des relations métriques entre les éléments). En revanche, les données issues de la tâche d'exploration mentale de distances ne montrent une corrélation entre le temps et les distances à parcourir que dans le cas d'une description verbale de l'environnement. Lorsque les participants apprennent la configuration de l'environnement virtuel en se déplaçant physiquement jusqu'à chaque source sonore, les données ne révèlent aucune corrélation entre les distances à parcourir et les temps de parcours mentaux. Ces résultats sont différents de ceux obtenus par Iachini et Giusberti (2003), qui avaient obtenu chez les participants voyants la relation linéaire typique entre temps et distances, à partir de l'apprentissage d'une configuration spatiale basée sur une exploration locomotrice.

Par ailleurs, grâce à la tâche de reconstruction de la scène initiale, nous avons pu observer que tous les participants (dont les voyants privés de vision) sous-estimaient la taille de l'environnement de départ après un apprentissage par description verbale. En revanche, à la suite d'une exploration active de l'environnement, seul les participants voyants privés de vision ont montré une capacité à reconstruire la taille exacte du cercle virtuel sur la périphérie duquel se trouvaient les sources sonores.

Ces résultats issus de l'analyse des pourcentages de réponses correctes suggèrent que les participants voyants privés de vision ont la capacité, après avoir été immergés dans un environnement virtuel permettant des déplacements, de générer une représentation mentale de l'environnement qui préserve, quelle que soit la modalité d'acquisition de l'environnement, son organisation topologique et les relations métriques entre les différents éléments. L'étude comparative entre les expériences menées en réalité virtuelle et celles issues des configurations de petite taille suggère, par ailleurs, que les représentations issues de ces dernières sont plus précises que celles issues de l'immersion dans l'environnement de taille réelle. En revanche, les temps d'exploration mentale ne diffèrent pas significativement selon que la taille de l'environnement initial est petite ou grande. Ces résultats vont à l'encontre de ceux obtenus par Iachini et Giusberti (2003) qui montrent que les temps d'exploration mentale sont d'autant plus longs que la taille de l'environnement initial est grand. La principale différence entre nos deux expérimentations repose sur le fait que nos participants apprenaient la disposition des objets à mémoriser à partir d'un environnement sonore, en se déplaçant seul, à chaque fois à partir du centre du cercle virtuel, jusqu'à chacune des sources sonores. Dans le cas de l'étude de Iachini et Giusberti (2003), la condition kinesthésique, sans perception visuelle initiale de la configuration, consistait pour le participant (guidé par l'expérimentateur)

à se déplacer le long d'un périmètre clos, constitué de six cercles dessinés sur le sol. Ainsi, non seulement la façon d'appréhender la configuration de l'environnement est différente (déplacement autonome du centre du cercle jusqu'à chacune des différentes sources sonore (nos travaux), vs déplacement le long de la périphérie, guidé par un expérimentateur (Iachini et Giusberti (2003)), mais la modalité utilisée pour délivrer la nature des objets est elle aussi différente (émission de sources sonores (nos travaux), vs description verbale de la couleur des différents cercles par l'expérimentateur (Iachini et Giusberti (2003))

En revanche, alors qu'elle leur permet de se représenter de manière exacte la taille de l'environnement initial, l'exploration active affecte considérablement la capacité des participants voyants privés de vision à explorer mentalement des distances entre les différents éléments. Ces résultats suggèrent que les processus impliqués dans les tâches d'exploration mentale de distances et ceux impliqués dans les tâches de comparaison mentale de distances, bien qu'ils soient tous deux de nature à nous informer sur la préservation des qualités métriques des représentations mentales, font appel à des mécanismes différents, qui peuvent être, ou non, affectés selon la condition d'apprentissage.

- Les participants non-voyants tardifs

En ce qui concerne les personnes qui ont bénéficié d'une expérience visuelle précoce et ont perdu tardivement la vue, nos données montrent que, quelle que soit la taille de l'environnement à partir duquel elles se créent une représentation mentale, cette dernière intègre l'organisation topologique et préserve les relations métriques existant entre les différents éléments. L'analyse des temps de réponse des tâches de comparaisons mentales de distances suggère cependant que les participants non-voyants tardifs bénéficient d'un apprentissage par exploration active de l'environnement par rapport à l'exploration tactile d'une configuration de petite taille. Toutefois, dans le cas de l'immersion dans l'environnement audio, qu'il ait été appris par description verbale ou bien par exploration active, les participants privés temporairement de vision sous-estiment systématiquement sa taille dès lors que leur tâche consiste à reconstruire la configuration spatiale des sources sonores. En outre, les résultats issus de la tâche d'exploration de distances montrent une corrélation positive entre le temps et la distance à parcourir mentalement, aussi bien à la suite de l'apprentissage de la configuration de petite taille que celle de grande taille, et ceci, quelle

que soit la condition d'acquisition, soit par description verbale, soit par exploration tactile / active.

En résumé, et d'après les résultats des expériences auxquelles les participants non-voyants tardifs ont été soumis dans le cadre de cette thèse, il apparaît que ces derniers se représentent les environnements de grande taille comme les configurations de petite taille, en conservant leurs topologies, et les relations métriques entre les différents éléments. Les régularités chronométriques, ainsi que les pourcentages de réponses correctes issus des tâches d'exploration de distances et de comparaison mentale de distances, révèlent un isomorphisme structural entre les représentations mentales de ces participants non-voyants tardifs et les environnements à partir desquels elles ont été construites. Ceci suggère clairement que la privation visuelle tardive n'affecte pas la capacité des participants à se représenter mentalement un environnement analogue à l'environnement initial.

- Les participants non-voyants de naissance

Les résultats que nous avons obtenus avec les participants dépourvus d'expérience visuelle précoce se sont révélés particulièrement intéressants. Les données issues de la tâche de comparaison mentale de distances indiquent que les participants non-voyants de naissance se représentent correctement l'environnement ou la configuration à mémoriser, quelle que soit sa taille initiale. En revanche, dans le cas de l'apprentissage d'une configuration de petite taille, ces participants mettent significativement plus de temps que les voyants privés de vision pour résoudre la tâche expérimentale. Ces résultats sont en accord avec les données de la littérature qui montrent que les participants non-voyants de naissance, bien qu'obtenant des performances similaires dans de nombreuses tâches, ont des temps de traitement nettement plus longs que ceux des participants voyants. Cette augmentation des temps de réponse n'est cependant pas nécessairement accompagnée d'un taux d'erreur plus important. Ceci a pu être mis en évidence par exemple dans des tâches de rotation mentale de stimuli tactiles (Marmor et Zaback, 1976). Les auteurs ont mis en évidence que les temps de réponse augmentent à mesure que la distance angulaire entre les formes s'accroît, les participants voyants étant significativement plus rapides que les non-voyants de naissance.

En revanche, dans notre *expérience 3*, nous avons observé une différence de performance. En effet alors que les participants voyants privés de vision reconstruisent la configuration spatiale en conservant de manière exacte la taille de l'environnement initial

après l'avoir exploré physiquement, les non-voyants de naissance (tout comme les participants non-voyants tardifs) sous-estiment systématiquement la taille de l'environnement, et ceci quelle que soit la condition d'apprentissage (par description verbale ou exploration active).

En outre, les données issues de l'analyse des temps d'exploration mentale de distances montrent une différence nette dans le comportement des personnes non-voyantes de naissance à la suite de l'apprentissage d'une configuration de petite taille ou bien d'un environnement de grande taille. En effet, alors que nous retrouvons une corrélation positive classique entre les distances et les temps de parcours mentaux à la suite de l'immersion dans l'environnement de grande taille, les données issues de l'apprentissage de la configuration de petite taille ne montrent aucune corrélation temps / distance, aussi bien après une description verbale qu'après une exploration tactile.

Ces résultats suggèrent que, dans le cas de l'apprentissage de la configuration spatiale d'un espace de déplacement, la privation précoce d'expérience visuelle n'a pas d'incidence spécifique. En effet, il semble que l'expérience visuelle précoce joue un rôle prépondérant dans l'expertise concernant la métrique fine. Cette hypothèse est confortée par les résultats que nous avons obtenus avec la tâche de comparaison mentale de distances sur les petites configurations. En effet, nous avons montré qu'au-delà d'un nombre d'erreurs plus important pour tous les groupes sur les petites différences de distances, les non-voyants de naissance font significativement plus d'erreurs dans le cas des petites différences de distances que les non-voyants tardifs et voyants privés de vision. Par ailleurs, alors qu'à la suite de l'apprentissage de la configuration de petite taille les participants non-voyants de naissance mettent significativement plus de temps que les participants voyants privés de vision pour comparer des distances, ceci n'est plus le cas après l'apprentissage de la configuration spatiale de l'environnement immersif.

Une explication plausible serait que les non-voyants de naissance ont exclusivement recours à d'autres stratégies et se reposent sur une forme d'imagerie spatiale non-visuelle pour former leurs représentations mentales. Ces stratégies seraient moins efficaces que l'imagerie visuelle utilisée par les groupes de personnes voyantes, ce qui nécessiterait de fait un processus d'élaboration plus long (Kaski, 2002). En revanche, plus l'environnement initial est étendu, et moins cette différence de stratégie serait coûteuse, se rapprochant des performances des personnes voyantes pour résoudre ces tâches.

Dans un autre registre, nous nous sommes posés la question au début de cette thèse des capacités d'adaptation des autres systèmes sensoriels à la privation de vision dès la naissance de l'individu. La question était de savoir dans quelle mesure les environnements spatiaux

étaient ou non correctement "internalisés" par les personnes dépourvues d'expérience visuelle précoce. Grâce aux expérimentations que nous avons menées dans cette thèse, nous pouvons sans équivoque conclure que la privation d'expérience visuelle précoce n'affecte pas la capacité des personnes à se représenter les environnements d'une façon qui préserve leur isomorphisme structural. Autrement dit, nous ne voyons pas apparaître de limites aux capacités d'adaptation des autres systèmes sensoriels pour permettre à l'individu de se représenter correctement les environnements (c'est-à-dire en préservant la topologie et les relations métriques entre les éléments). En effet, les différences, notamment dans les temps de réponse, suggèrent que la privation visuelle précoce engendre le recours, pour résoudre les tâches, à des stratégies plus coûteuses que le simple recours à une image mentale, ce qui se traduit par des temps de réponse plus longs.

Le format des représentations mentales

Les données issues de nos expériences suggèrent une réflexion plus générale sur le format des représentations mentales et plus exactement, sur l'implication de la vision ou de l'expérience visuelle dans la préservation des qualités structurales des représentations mentales. En effet, les données de la littérature concluent au caractère imagé des représentations mentales des configurations spatiales, puisque les régularités chronométriques qui se manifestent dans les différentes tâches font apparaître que les images mentales gardent une trace de la métrique de l'arrangement spatial des objets évoqués (Denis, 1996 ; Denis et Kosslyn, 1999), que ces images aient été construites à partir d'informations visuelles (Kosslyn, 1973 ; Kosslyn et al., 1978) ou de descriptions verbales (Denis et Cocude, 1989, 1992, 1997). De la même manière, le phénomène de "comparaison symbolique" bien établi en psychophysique, selon lequel les jugements de différences (par exemple, la différence de taille) entre des objets évoqués de mémoire, requièrent d'autant plus de temps que l'ampleur de la différence jugée est plus importante (Moyer, 1973 ; Paivio, 1975) a été confirmé au niveau des représentations mentales. L'ensemble de ces éléments a conduit la plupart des chercheurs à conclure au caractère visuel des images mentales.

Les données que nous avons obtenues en soumettant des participants non-voyants de naissance, mais aussi tardifs, aux expérimentations de comparaison mentale de distances montrent que ces deux groupes de participants sont capables de générer des représentations mentales qui gardent une trace de la métrique des arrangements spatiaux, aussi bien dans le

cas de petites configurations que dans le cas d'environnements de grande taille. Par ailleurs, nous retrouvons chez ces participants l'effet dit de "comparaison symbolique".

Ces données suggèrent donc que les régularités chronométriques ne seraient pas nécessairement le reflet de représentations mentales à caractère visuel, mais plutôt de représentations mentales de nature spatiale, qui conserveraient les caractéristiques géométriques des environnements initiaux, leur caractère analogique, et qui prendraient différentes formes selon que l'individu bénéficie ou non de l'intégralité de ses systèmes sensoriels. Dans le cas où tous les systèmes sont conservés, les participants auraient recours, pour résoudre les tâches d'imagerie mentale, à des représentations mentales à caractère visuel, permettant d'avoir accès simultanément à l'ensemble des informations disponibles. En revanche, dans le cas des personnes privées d'un de leurs sens, les "images" mentales seraient instanciées selon une autre forme dépendante du type de privation. Ainsi, dans le cas des personnes non-voyantes de naissance, les images mentales seraient de nature tactile. Ceci pourrait expliquer pourquoi chez les individus non-voyants de naissance, la plupart des études montrent des performances similaires à celles obtenues par les participants voyants, mais nécessitant néanmoins des temps de traitement supérieurs à ceux des voyants. En effet, le recours à des images mentales tactiles ou kinesthésiques ne permet qu'un accès séquentiel aux informations spatiales et, de ce fait, engendre une augmentation des temps de réponse. Ceci pourrait par ailleurs expliquer pourquoi nous observons, dans le cas des petites configurations, un temps de réponse (dans la tâche de comparaison mentale de distances) significativement plus important chez les personnes non-voyantes que chez les personnes voyantes, ce qui n'est plus le cas dès lors que l'environnement permet un apprentissage par exploration active. En effet, un apprentissage par exploration active permet à la personne non-voyante d'assimiler son environnement par une modalité préférentielle (par rapport à une description verbale) et, de fait, de se représenter cet environnement selon un canal qui lui est plus propre. Ceci expliquerait pourquoi, dans cette condition, les temps de réponse ne diffèrent pas significativement entre les groupes. Ainsi, les non-voyants génèrent bien des images mentales, mais ces images mentales sont différentes des images mentales visuelles : elles ont un format bien spécifique, et ne sont ni des raisonnements verbaux, ni ne peuvent être réduites à d'autres systèmes de représentations connus (Cornoldi et Vecchi, 2000). Reisberg (1997) écrit d'ailleurs à propos des performances des personnes non-voyantes dans la résolution de tâches d'imagerie mentale:

"it seems unlikely that blind subjects are using visual imagery to perform these tasks. Therefore, these subjects must have some other means of thinking about spatial layouts and spatial relations. This "spatial imagery" might be represented in the mind in terms of a series of imagined movements, so that it is "body imagery" or "motion imagery" rather than visual imagery. Alternatively, perhaps spatial imagery is not tied to any sensory modality, but is part of our broader cognition about spatial arrangements and layouts. " (Reisberg, 1997, p.409).

De la même manière nous pouvons faire l'hypothèse que l'information provenant d'un environnement uniquement exploré tactilement par une personne voyante nécessite une traduction de l'information sous une forme visuelle. Dans ce cas précis, les temps de réponse ne seraient cependant pas nécessairement affectés de façon significative puisque, une fois sous forme visuelle, l'image mentale permettrait l'accès simultané à l'ensemble de l'information.

Un point important également concerne les performances obtenues par les participants voyants privés de vision. Dans l'expérience où nous avons immergé les participants dans le monde virtuel, la condition d'apprentissage par description verbale s'est avérée favorable à la génération d'images mentales visuelles. La condition d'exploration active, en revanche, était de nature à favoriser la construction de boucles sensorimotrices, par association entre les déplacements des participants, et les modifications au niveau de leur perception. Dans cette condition, en effet, les participants, quels que soient leurs degrés de privation visuelle, apprenaient la configuration de l'environnement en se déplaçant physiquement en son sein. Au regard des résultats, il s'avère que les voyants privés temporairement de vision, bien qu'étant capables de comparer correctement les distances (ce qui suggère qu'ils ont bien analysé et intégré la configuration spatiale des sources sonores composant l'environnement) n'explorent plus du tout les distances comme ils le font dans le cas de petites configurations. Ce résultat suggère donc qu'une stratégie différente pourrait se mettre en place, chez les voyants privés de vision, dans la représentation de cet espace, qui conserverait bien ses propriétés analogiques, et donc les relations métriques entre les éléments, mais ne permettrait plus de retrouver la corrélation "classique" temps / distances.

Nous serions, dans ce cas de figure, proche de celui des participants non-voyants qui doivent mettre en œuvre des stratégies parallèles pour résoudre les tâches d'exploration mentale, stratégies qui se traduisent par l'absence de corrélation temps / distances, alors que

les relations métriques entre les éléments ainsi que leur organisation topologique sont conservées.

Expérimentations à poursuivre

Une façon d'observer s'il s'agit bien, dans les différents cas envisagés, de stratégies différentes, consisterait à comparer pour chaque groupe la façon dont ils reconstruisent l'environnement dans lequel ils ont été immergés. Nous pouvons en effet imaginer que les stratégies mises en œuvre pour résoudre cette tâche seront dépendantes du type d'apprentissage auquel ont été soumis les participants. Par exemple, les participants qui ont appris la configuration spatiale des sources sonores par l'apprentissage des boucles sensorimotrices pourraient avoir tendance à rejouer les déplacements moteurs qui leur ont permis d'apprendre cette configuration, alors que ceux qui ont été soumis à une description verbale pourraient avoir une stratégie différente. Il serait intéressant d'observer, au sein d'un même groupe, notamment celui des voyants privés de vision, si une différence systématique de la stratégie motrice utilisée pour reconstruire la scène est observable.

Pour tester l'hypothèse selon laquelle les participants non-voyants de naissance ont plus de difficultés à traiter la métrique fine au sein des environnements que les personnes ayant bénéficié d'une expérience visuelle précoce, nous les avons soumis à une autre tâche expérimentale. Il s'agissait pour eux de détecter, parmi cinq nouvelles scènes (comportant l'ensemble des six sources sonores), si des modifications topologiques (inversion de sources sonores) et / ou des modifications de positions entre différents objets avaient été effectuées. Ces modifications étaient soit évidentes, soit résultaient de modifications très fines. Les résultats de cette expérimentation ne sont pas encore dépouillés, leur analyse sortant du cadre de cette thèse. Néanmoins, ces résultats seront de nature à confirmer l'hypothèse selon laquelle les participants dépourvus d'expérience visuelle précoce ont d'autant plus de mal à détecter les changements que ceux-ci sont minimes, alors que les changements d'ordre topologique ne leur poseraient aucune difficulté.

Conclusions et perspectives

Des données issues de ces travaux, nous dégagons des éléments en faveur du caractère "amodal" des représentations mentales de l'espace, plutôt que l'acception plus commune de leur caractère imagé. En effet, nos données vont dans le sens de celles qui suggèrent l'existence de représentations mentales qui peuvent être instanciées sous différentes formes, visuelles, tactiles, kinesthésiques, etc. (Cornoldi et Vecchi, 2000; Kaski, 2002 ; Reisberg, 1997). Par ailleurs, nous montrons que les performances généralement observées dans les tâches d'imagerie mentale sont tributaires de la préservation de l'intégralité des sens de l'individu (Afonso, Gaunet et Denis, 2003 ; Cornoldi et al., 1991; Cornoldi & Vecchi, 2000 ; Kerr, 1983 ; Marmor et Zaback 1976 ; Thinus-Blanc & Gaunet, 1997).

Un dernier résultat issu de nos travaux montre que la taille de la configuration initiale (petite ou grande) à partir de laquelle les participants doivent générer mentalement une représentation n'a pas d'incidence significative sur les temps de réponse des participants, quel que soit leur groupe. Ceci suggère un phénomène important : les individus travaillent sur des distances relatives, et non pas absolues. Ainsi, que les personnes soit non voyantes de naissance, tardives ou voyantes, toutes ont la capacité de se représenter des environnements qui préservent les relations métriques et la topologie des environnements initiaux (voir les résultats des tâches de comparaison mentale de distances). En outre, la taille de cette représentation n'est ni dépendante du statut visuel de la personne, ni de la taille de l'environnement initial mémorisé.

Cependant, un apport important de ce travail de thèse repose sur la mise en évidence de stratégies différentes mises en œuvre en fonction de la taille initiale de l'environnement à mémoriser. Les résultats suggèrent en effet que dans le cas des environnements de grande taille, tous les participants se représentent correctement leur environnement, sans difficultés particulières. En revanche, dans le cas des petits environnements, les difficultés liées à la privation d'expérience visuelle précoce seraient importantes, et d'autant plus si l'attention du participant non-voyant de naissance doit se focaliser sur la question de la métrique fine.

Au-delà de l'expérimentation à laquelle nous avons déjà soumis nos participants consistant à détecter des modifications de positionnement d'objets au sein de la configuration de l'environnement initial, qui pourrait confirmer ou infirmer notre hypothèse, une autre expérience pourrait être proposée. En effet, nous sommes parvenus à montrer que dès lors qu'un environnement atteignait la taille de 3 m de diamètre, la privation d'expérience visuelle

précoce n'avait plus d'incidence sur le traitement des petites différences de distance. En revanche, dans le cas de configurations de l'ordre de 50 cm de diamètre, l'évaluation des relations métriques fines entre des petites distances devenait plus critique. Il serait donc particulièrement intéressant de tester deux idées.

Une première démarche consisterait à proposer différentes tailles de configurations à mémoriser à des participants non-voyants de naissance, en leur demandant d'effectuer après cet apprentissage des tâches permettant d'évaluer leurs capacités à comparer mentalement des petites différences de distances, ainsi que des tâches permettant de détecter les seuils à partir desquels les changements métriques fins au sein des configurations spatiales ne sont plus perçus.

Une seconde expérience pourrait concerner la distinction entre le fait d'être ou non immergé dans l'environnement initial. Nous pourrions en effet faire l'hypothèse selon laquelle les participants parviennent à de meilleures performances dans l'environnement de grande taille tout simplement parce qu'ils y ont été physiquement immergés, par opposition avec la configuration de petite taille. Ainsi, ce qui serait "facilitateur" ne serait pas la taille de l'environnement, mais le fait de pouvoir être "dans" cet espace, plutôt que d'avoir uniquement accès à cet espace par une "carte".

Il serait intéressant d'observer les performances des participants voyants et non-voyants, dans des tâches de comparaison mentale et d'exploration mentale de distance, en faisant varier la taille et le statut de l'immersion du participant dans l'environnement. Nous pourrions proposer une configuration de 50 cm, présentée face au participant (comme dans nos *expériences 1 et 2*) ; une configuration nettement plus grande, d'1,50 m de diamètre, tout en s'assurant que le participant puisse en prendre connaissance sans pour autant être "dans" l'environnement, et enfin, une configuration de la même envergure, mais dans laquelle les participants seraient immergés pour apprendre la configuration.

Les résultats comparés issus de ces trois types d'environnements seraient de nature à répondre à la question de l'importance, pour la construction d'une représentation préservant les relations métriques et la topologie des éléments d'une configuration, de l'immersion des individus dans les environnements concernés par rapport à un simple effet de taille des environnements à apprendre.

Références bibliographiques

A.

Afonso, A., Gaunet, F., & Denis, M. (2004). The mental comparison of distances in a verbally described spatial layout: Effects of visual deprivation. Special issue on *Imagination, Cognition and Personality*, **23**, 173-182.

Afonso, A., Katz, B. F.G., Blum, A., Jacquemin, C. & Denis, M. (2005). A Study of Spatial Cognition in an Immersive Virtual Audio Environment: Comparing Blind and Blindfolded Individuals. *Proceedings of ICAD 05, 11th Meeting of the International Conference on Auditory Display*, Limerick, Ireland.

Arbib, M.A. (1980). Perceptual structures and distributed motor control. In V.B. Brooks (Ed.), *Handbook of Physiology (vol. III): Motor Control*. Bethesda, Maryland: The American Physiological Society.

Arditi, A., Holtzman, J. D. & Kosslyn, S. M. (1988). Mental imagery and sensory experience in congenital blindness. *Neuropsychologia*, **26**, 1-12.

Arno, P., De Volder, A., Vanlierde, A., Wanet-Defalque, M.C., Strel, E., Robert, A., Sanabria-Bohorquez, S., Veraart, C. (2001). Occipital activation by pattern recognition in the Early Blind using auditory substitution of vision. *NeuroImage*, **13**, 632-645.

Ashmead, D. H., Wall, R.S., Ebinger, K.A., Eaton, S.B., Snook-Hill M-M., & Yang, X. (1998). Spatial hearing in children with visual disabilities. *Perception*, **27**, 105-122.

Aziz-Sultan, A., Weeks, R. A., Tian, B., Cohen, I. G., Rauschecker, J. P. & Hallett, M. (1997). Auditory localisation demonstrates cross modal plasticity in congenitally blind subjects. *Neurology*, **84**, 219.

B.

Bach-y-Rita, P., Collins, C., Saunders, F., White, B. & Scadden, L. (1969). Vision Substitution by Tactile Image Projection. *Nature*, **221**, pp. 963-964.

Bayley, N. (1969). Bayley scales of infant development. New York : The Psychological Corporation.

Begault, D. (1994). 3-D Sound for virtual reality and multimedia. *Academic Press*.

Berman, N. E. J. (1991). Alterations of visual cortical connections in cats following early removal of retinal input. *Developmental Brain Research*, **63**, 163-180.

Bloom, P., Peterson M. A., Nadel, L. & Garrett M.F (1996). *Language and space*. Cambridge: MA: MIT Press.

Bross, M. & Borenstein, M. (1982). Temporal auditory acuity in blind as compared with sighted subjects: a signal detection analysis. *Perceptual Motor Skills*, **55**, 963-966.

Buechel, C., Price, C., Frackowiak, R. S. J. & Friston, K. (1998). Different activation patterns in the visual cortex of late and congenitally blind subjects. *Brain*, **121**, 409-419.

Bull R, Rathborn H, Clifford BR (1983) The voice recognition accuracy of blind listeners. *Perception*, **12**, 223-226.

Byrne, R. W. & Salter, E. (1983). Distances and directions in the cognitive maps of the blind. *Canadian Journal of Psychology*, **37**(2), 293-299

C.

Carpenter, P. A., & Eisenberg, P. (1978). Mental rotation and the frame of reference in blind and sighted individuals. *Perception & Psychophysics*, **23**, 117-124.

Chabanne, V., Péruch, P., Denis, M., & Thinus-Blanc, C. (2004). Mental scanning of images constructed from visual experience or verbal descriptions: The impact of survey versus route perspective. *Imagination, Cognition and Personality*, **23**, 163-171.

Changeux, J.P. (1983). *L'Homme neuronal*, Paris : Fayard

Changeux, J.P. & Dehaene, S. (1989) Neuronal models of cognitive functions. *Cognition*, **33**, 63-109.

Chatterjee, A., Southwood, M.H. & Basilico, D. (1999). Verbs, events and spatial representations. *Neuropsychologia*, **37**, 395-402

Cocude, M., Mellet, E. & Denis, M. (1999). Visual and mental exploration of visuo-spatial configurations: Behavioral and neuroimaging approaches. *Psychological Research*, **62**, 93-106.

Cohen, G.L., Celnik, P. & Pascual-Leone, A. (1997). Functional relevance of cross-modal plasticity in blind humans. *Nature*, **389**, 285-315.

Compan, V. & Afonso, A. *Neurobiologie et Addictions. Psychologie, Emotions et Neurosciences*. Collection "SUP Psychologie", Editions Belin (sous presse).

Cornoldi, C., De Beni, R. & Pra Baldi, A. (1989). Generation and retrieval of general, specific and autobiographic images representing concrete nouns. *Acta Psychologica*, **72**, 25-39.

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**, 459-68.

Cornoldi, C. Vecchi, T. (2000). Mental imagery in blind people : The role of passive and active visuo-spatial processes. In M. H. (Ed.) (Ed.), *Touch, representation, and blindness*, 143-181. New York: Oxford University Press.

Cronin, V., Mc Laren, J. & Campbell, E. (1983). Sensory compensation in blind persons: a comparison of visual and tactual recognition. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, **77** (10), 489-490.

D.

Davidson, P.W., Barnes, J.K. & Mullen, G. (1974). Differential effects of task memory demand on haptic matching of shape by blind and sighted humans. *Neuropsychologia*, **12**(3), 395-397.

De Beni, R. & Pazzaglia, F. (1995). Memory for different kinds of mental images: role of contextual and autobiographic variables. *Neuropsychologia*, **33**(11), 1359-1371.

Denis, M. & Carfantan, M. (1985). People's knowledge about images. *Cognition*, **20**, 49-60.

Denis, M. (1979). *Les images mentales*. Paris : Presses Universitaires de France.

Denis, M., & Cocude, M. (1989). Scanning visual images generated from verbal descriptions. *European Journal of Cognitive Psychology*, **1**, 293-307.

Denis, M. Cocude, M. (1992). Structural properties of visual images constructed from poorly or well-structured verbal descriptions. *Memory and Cognition*, **20**, 497-506.

Denis, M. Cocude, M (1997). On the metric properties of visual images generated from verbal descriptions: Evidence for the robustness of the mental scanning effect. *European Journal of Cognitive Psychology*, **9**, 353-379.

Denis, M. (1991). Cognitive and metacognitive approaches to visual imagery. *Scientific Contributions to General Psychology*, **6**, 7-18.

Denis, M. Zimmer, H. D. (1992). Analog properties of cognitive maps constructed from verbal descriptions. *Psychological Research*, **54**, 286-298.

Denis, M. (1994). *Image et cognition*. Paris: Presses Universitaires de France.

Denis, M., Gonçalves, M.-R., & Memmi, D. (1995). Mental scanning of visual images generated from verbal descriptions: Towards a model of image accuracy. *Neuropsychologia*, **33**, 1511-1530.

Denis, M. (1996). Imagery and the description of spatial configurations. In M. I.-P. M. De Vega, P. N. Johnson-Laird, M. Denis & M. Marschark (Eds) (Ed.), *Models of visuo-spatial cognition* (pp. 128-197). New York: Oxford University Press.

Denis, M. (1998). Imagerie mentale; Représentation. In O. Houdé, D. Kayser, O. Koenig, J. Proust, & F. Rastier (Eds.), *Vocabulaire de sciences cognitives* (pp. 201-203; 345-347). Paris: Presses Universitaires de France.

Denis, M. Kosslyn, S. M. (1999). Scanning visual mental images: A window on the mind. *Cahiers de Psychologie Cognitive/ Current Psychology of Cognition*, **18**, 409-465.

D'Esposito, M., Detre, J. A., Aguirre G. K., Stallcup, M., Alsop, D. C., Tippet, L. J. & Farah, M. J. (1997). A functional MRI study of mental image generation. *Neuropsychologia*, **35**, 725-730.

De Volder, A.G. (1995). Functional reorganization of the human cerebral cortex in case of early sensory deafferentation (blindness or deafness) : therapeutic implications, "thèse d'agrégation de l'enseignement supérieur Université Catholique de Louvain", Thesis (in French), JAC Offset, Brussels.

De Volder, A.G., Bol, A., Blin, J. Robert, A., Arno, P., Grandin, C., Michel, C. & Veraart, C. (1997). Brain energy metabolism in early blind subjects : Neural activity in the visual cortex. *Brain Research*, **750**, 235-244.

De Volder, A. G., Catalan-Ahumada, M., Robert, A., Bol, A., Labar, D., Coppens, A., Michel, C. & Veraart, C. (1999). Changes in occipital cortex activity in early blind humans using a sensory substitution device. *Brain Research*, **826**, 128-134.

De Volder AG, Toyama H, Kimura Y, Kiyosawa M, Nakano H, Vanlierde A, Wanet-Defalque MC, Mishina M, Oda K, Ishiwata K, and Senda M. (2001). Auditory triggered mental imagery of shape involves visual association areas in early blind humans. *Neuroimage*, **14**, 129-139.

E.

Edelman, G.M. (1987). Neural darwinisme. New York : Basic Book.

Edelman, G.M. (1992). Biologie de la conscience. Paris : Odile Jacob.

Ernest, C.H. (1987). Imagery and memory in the blind, a review. In Mc Daniel, M.A. & Presley, M. (Eds), *Imagery and related mnemonic processes : theories individual differences and applications* 218-337. New York, Springer-Verlag.

F.

Finke, R.A. & Pinker, S. (1982). Spontaneous mental image scanning in mental extrapolation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, **8**, 142-147.

Finke, R. A. (1989). Principles of Mental Imagery, MIT Press, Cambridge, MA.

Fletcher, J.F. (1980): Spatial Representations in blind children. 3: Effect of individual differences. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, **75**, 46-49.

Fodor, J. (1975) Fodor. The language of thought. Cambridge, Ma.: Harvard University Press.

Foulke, E., & Warm, J. (1967). Effects of complexity and redundancy on the tactual recognition of metric figures. *Perceptual and Motor Skills*, **25**, 177-187.

Fraiberg, S. (1977). *Insights from the blind: Comparative studies of blind and sighted infants*. New York. Basic Books.

Frauenberger, C. & Noisternig, M. (2003). 3D Audio Interfaces for the Blind. in *ICAD Proceedings*, July 6-9.

G.

Gaunet, F. (1996). Rôle des informations sensorielles et de l'expérience visuelle précoce dans l'élaboration et l'utilisation des représentations spatiales. Thèse de Doctorat. Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II.

Gaunet, F., Thinus-Blanc, C. (1996). Early blind subjects' spatial abilities in the locomotor space: Exploratory strategies and reaction-to-change performance. *Perception*, **25**, 967 - 981

Gaunet, F., Martinez, J-L, Thinus-Blanc, C. (1997). Early blind subjects' spatial representation of manipulatory space: Exploratory strategies and reaction to change. *Perception*, **26**, 345 - 366.

Gibson, J.J. (1977). The theory of affordances. In R.Shaw and J.Brandsford, editors, *Perceiving, Acting, and Knowing: Toward and Ecological Psychology*, 62--82.

Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston, MA: Houghton Mifflin.

Guenther, R. K. (1980). Conceptual memory for picture and prose episodes. *Memory and Cognition*, **8** (6), 563-572.

H.

Haber, L., Haber, RN, Penningroth, S., Novak, K., & Radgowski, H. (1993). Comparison of nine methods of indicating the direction to objects : data from blind adults. *Perception*, **22**, 35-47.

Harter, M.R., Deaton, F.K. & Odom, J.V. (1977). Pattern visual evoked potentials in infants. Visual Evoked Potentials in Man : New developments. In J.E. Desmedt, (Eds). Clarendon Press, Oxford.

Hatwell, Y. (1966). Privation sensorielle et intelligence. Paris, PUF.

Hatwell, Y. (1978). Form perception and related issues in blind humans. In R. Held, H. W. Leibowitz & H. L. Teuber (Eds.), *Handbook of sensory physiology, VII: Perception*. New York and Berlin: Springer Verlag.

Hatwell, Y. (1985). *Piagetian reasoning and the blind*. New York : American Foundation for the Blind (translated from : Y. Hatwell (1966), *Privation sensorielle et intelligence. Effets de la cécité précoce sur la genèse des structures logiques de l'intelligence*. Paris : Presses Universitaires de France).

Heller, M.A., & Kennedy, J.M. (1990). Perspective taking, pictures and the blind. *Perception & Psychophysics*, **48**, 459-466.

Herman, JF, Chatman, SP & Roth, SF (1983). Cognitive mapping in blind people: acquisition of spatial relationship in a large scale environment. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, **77**, 161-166.

Hollins, M. (1989). *Understanding Blindness : An Integrative Approach*. Hillsdale, NJ & Hove and London: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.

Hubel, D. H. & Wiesel, T. N. (1963). Receptive fields of cells in striate cortex of very young, visually inexperienced kittens. *Journal of Neurophysiology*, **26**, 994--1002.

I.

Iachini, T. & Giusberti, F. (2004). Metric properties of spatial images generated from locomotion: the effect of absolute size on mental scanning. *European Journal of Cognitive Psychology*, **16** (4), 573-596.

Intons-Peterson, M.J. & Roskos-Ewoldsen, B.B. (1989). Sensory-perceptual qualities of images. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, **15**, 188-199.

J.

Jacobson, M. (1978). *Developmental Neurobiology*. Holt Rinehart & Winston, New York.

Janson, U. (1993). Normal and deviant behaviour in blind children with ROP. *Acta Ophthalmologica*, Supplement, **210**, 20-26.

Jolicoeur, P. & Kosslyn, S.M. (1985). Demand characteristics in image scanning experiments. *Journal of Mental Imagery*, **9**(2), 41-50.

K.

Kaski, D. (2002). Revision: is visual perception a requisite for visual imagery? *Perception*, **31**(6), 717-731.

Kerr, N. H. (1983). The role of vision in "visual imagery" experiments. Evidence from the congenitally blind. *Journal of Experimental Psychology: General*, **112**, 265-277.

Klein, I., Paradis, A. L., Poline, J. B., Kosslyn, S. M., & Le Bihan, D. (2000). Transient activity in the human calcarine cortex during visual-mental imagery: an event-related fMRI study. *J.Cogn.Neurosci.* **12 Suppl 2**, 15-23.

Knauff, M., Kassubek, J., Mulack T. & Greenlee, M. (2000). Cortical activation evoked by visual mental imagery as measured by functional MRI. *NeuroReport*, **11**(18), 3957-3962.

Kosslyn, S. (1973). Scanning mental images: some structural implications. *Perception and Psychophysics*, **14**, 90-94.

Kosslyn, S. M. (1975). Information representation in visual images. *Cognitive Psychology*, **7**, 341-371.

Kosslyn, S. M., and Pomerantz, J. R. (1977). Imagery, propositions, and the form of internal representations. *Cognitive Psychology*, **9**, 52-76.

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. (1980). *Image and mind*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.

Kosslyn, S. M., Alpert, N. M., Thompson, W. L., Maljkovic, V., Weise, S. B., Chabris, C. F., Hamilton, S. E., Rauch, S. L. & Buonanno, F. S. (1993). Visual mental imagery activates topographically organized visual cortex : PET investigations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **5**, 263-287.

Kosslyn, S. M. (1994). *Image and brain*. Cambridge, Mass.: The MIT Press.

Kosslyn, S. M., Thompson, W. L., Kim, I. J., & Alpert, N. M. (1995). Topographical representations of mental images in primary visual cortex. *Nature*, **378**(Nov 30), 496-498.

Kosslyn, S. M., Thompson, W. L. & Alpert, N. M. (1997). Neural systems shared by visual imagery and visual perception: A positron emission tomography study. *NeuroImage*, **6**, 320-334.

Kosslyn S.M., Pascual-Leone A., Felician O., Camposano S., Keenan J.P., Thompson W.L., Ganis G., Sukel K.E., & Alpert N.M. (1999). The role of area 17 in visual imagery: convergent evidence from PET and rTMS. *Science*, **284** (5411), 167-70.

Kujala T, Alho K, Paavilainen P, Summala H, and Naatanen R, 1992 "Neural plasticity in processing of sound location by the early blind: an event related potential study" *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **84**, 469-472.

Külpe, O. (1901). *Outlines of Psychology*. New York: The MacMillan Co.

L.

Landau, B., Gleitman, L.R. (1985). *Language and experience : Evidence from the blind child*. Cambridge: Harvard University Press.

Lambert, S., Sampaio, E., Scheiber, C., & Mauss, Y. (2002). Neural substrates of mental imagery : calcarine sulcus and dorsal pathway involvement - an fMRI study. *Brain Research*, **924**, 176-183.

Lambrey, S. & Berthoz, A . (2003) : Combination of conflicting visual and non-visual information for estimating actively performed body turns in virtual reality. *International Journal of Psychophysiology*, *50(1-2):101-15*.

Larsen, S. & Håkonsen, K. (1983). Absence of ear asymmetry in blind children on a dichotic listening task compared to sighted controls. *Brain Lang*, **18**, 192-198.

Le Bihan, D., Turner R., Zeffiro T.A., Cuénod C.A., Jezzard P., & Bonnerot V. (1993). Activation of human primary visual cortex during visual recall : A magnetic resonance imaging study. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* *90*, 11802-11805.

Le Bihan, D. (1995). *Magnetic Resonance Imaging of Diffusion and Perfusion : Applications to Functional Imaging*. Ed. Lippincott-Raven Press, New York.

Lenay, C. (2002). Ignorance et Suppléance : la question de l'espace , *HDR*, Université de technologie de Compiègne, France.

Lessard, N., Pare, M., Lepore, F & Lassonde, M. (1998). Early blind human subjects localize sound sources better than sighted subjects. *Nature*, **395**(6699), 278-280.

Lewald, J. (2002). Opposing effects of head position on sound localization in blind and sighted human subjects. *European Journal of Neuroscience*, **15**, 1219-1224.

Loomis, J. M. (1985). Digital map and navigation system for the visually impaired. Unpublished paper, Department of Psychology, University of California, Santa Barbara.

Loomis, J. M., Da Silva, J.A., Fujita, N., & Fukusima, S. S. (1992) Visual space perception and visually directed action. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **18**, 906-921.

Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Philbeck, J. W. & Golledge, R. G. (1998). Assessing auditory distance perception using perceptually directed action. *Perception & Psychophysics*, **60**(6), 966-980.

Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Philbeck, J. W., & Golledge, R. G. (1998) Assessing auditory distance perception using perceptually directed action. *Perception & Psychophysics*, **60**, 966-980

Loomis, J., Klatzky, R.L. & Golledge, R.G. (1999). Auditory distance perception in real, virtual, and mixed environments. *Mixed reality: Merging real and virtual worlds*, Y. Ohta and H. Tamura (Eds.), Tokyo, Ohmsha, 201-214.

M.

- Marmor, G. S. & Zaback., L. A. (1976). Mental rotation by the blind: does mental rotation depend on mental imagery. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **2**, 515-521.
- Mayer, A. & Orth, J. (1901). Zur qualitativen Untersuchung der Assoziationen. *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*, **26**, 1-13.
- Mellet, E., Tzourio, N., Denis, M. & Mazoyer, B. (1995). A positron emission tomography study of visual and mental spatial exploration. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **7**, 433-445.
- 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(20)**, 6504-6512.
- Mellet, E., Kosslyn, S.M., Denis, M. et al. (2000). Functional anatomy of high-resolution visual mental imagery. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **12(1)**, 98-109.
- Mellet, E., Tzourio-Mazoyer, N., Bricogne, S., Mazoyer, B., Kosslyn, S.M. & Denis, M. (2000). Functional anatomy of high-resolution visual mental imagery. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **12**, 98-109.
- Mershon, D.H. & King, L.E. (1975). Intensity and reverberation as factors in auditory perception of egocentric distance. *Percept Psychophys*, **18**, 409-415.
- Mershon, D.H. (1997). Phenomenal geometry and the measurement of perceived auditory distance. In R. H. Gilkey and T. R. Anderson (Eds.), *Binaural and spatial hearing in real and virtual environments* (257-274). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Millar, S. (1994). *Understanding and representing space. Theory and evidence from studies with blind and sighted children*. Oxford: England: Clarendon Press.
- Miller, G.A. (1992). Dan Gable. In F. Magill (Ed.), *The Twentieth Century: Great Athletes*. Pasadena, CA: Salem Press, Inc
- Minnaar, P., Olesen, S.K., Christensen, F. & Moller, H. (2001). The importance of head movements for binaural room synthesis. In *Proceedings of the International Conference on Auditory Display (ICAD 2001)*, Espoo, Finland.
- Moyer, R. S. (1973). Comparing objects in memory: Evidence suggesting an internal psychophysics. *Perception and Psychophysics*, **13**, 180-184.

N.

- Neisser, U. (1967). *Cognitive psychology*. Englewood Cliffs, NJ.

Norman, J. (2002). Two visual systems and two theories of perception: An attempt to reconcile the constructivist and ecological approaches. *Behavioral and Brain Sciences*, **25** (1), 73-96

O.

Ochaíta, E., & Huertas, J. A. (1993). Spatial representation by persons who are blind: a study of the effects of learning and development. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, **87**, 37-41.

Ogawa, S., Menon, R. S., Tank, D. W., Kim, S.-G., Merkle, H., Ellermann, J. M., & Ugurbil, K. (1993). Functional brain mapping by blood oxygenation level-dependent contrast magnetic resonance imaging. *Biophys J*, **64** (3), 803-812.

O'Regan, J.K. (1992). Solving the "real" mysteries of visual perception: the world as an outside memory. *Canadian Journal of Psychology*, **46**, 461-488.

O'Regan, J.K. & Noë, A. (2001): A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, **24** (5), 939-1011

P.

Paivio, A. (1971). *Imagery and Verbal Processes*. New York: Holt, Rinehart & Winston,

Paivio, A. & Okavita, H.W. (1971). Word imagery modalities and associative learning in blind and sighted subjects. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, **10**, 506-510.

Paivio, A. (1986). *Mental representations: A dual coding approach*. New York: Oxford University Press.

Philbeck, J. W. & Loomis, J. M. (1997). Comparison of two indicators of visually perceived egocentric distance under full-cue and reduced-cue conditions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **23**, 72-85.

Piaget J., Inhelder B. (1966) *L'image mentale chez l'enfant*, Paris, PUF.

Pick, H.L., Warren D.H. & Hay, J.C. (1969). Sensory conflict in judgments of spatial direction. *Perception & Psychophysics*, **6**, 203-205.

Pinker, S., Choate, P. & Finke, R.A. (1984). Mental extrapolation in patterns constructed from memory. *Memory and Cognition*, **12**, 207-218.

Poincaré, H. (1905). Les mathématiques et la logique. *Revue de métaphysique et de morale*, **13**, 815-835.

Poincaré, H. (1907). La relativité de l'espace", *Année psychologique*, **13**, 1-17

Portalier, S. & Vital-Durand, F. (1989). Locomotion chez les enfants mal-voyants et aveugles. *Psychologie Française*, **34-1**, 79-85.

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. (1980). The 'Causal Power' of Machines. *Behavioral and Brain Sciences*, **3**, 442-444.

Pylyshyn, Z. W. (1981). The imagery debate: Analogue media versus tacit knowledge. *Psychological Review*, **88**, 16-45.

Pylyshyn, Z.W. (2002), Mental imagery? In search of a theory. *Behavioral and Brain Sciences*, **25 (2)**, 157–182.

R.

Richardson, J. T. E. (1999). *Imagery*. Hove: UK: Psychology Press.

Rieser, J.J., Lockman, J.J. & Pick, H.L. (1980). The role of visual experience in knowledge of spatial layout. *Perception & Psychophysics*, **28**, 189-190

Rieser, J.J., Guth, D.A. & Hill, E.W. (1986). Sensitivity to perceptive structure while walking without vision, *Perception*, **15**, 173-188.

Rieser, J. J., Hill, E. W., Talor, C. R., Bradfield, A., & Rosen, S. (1992). Visual experience, visual field size, and the development of nonvisual sensitivity to the spatial structure of outdoor neighborhoods explored by walking. *Journal of Experimental Psychology: General*, **121**, 210-222

Röder, B., Teder-Salejarvi, W., Sterr, A., Rosler, F., Hillyard, S. A. & Neville, H. J. (1999). Improved auditory spatial tuning in blind humans. *Nature*, **400**, 162-166.

Röder, B. & Rösler, F. (1998). Visual input does not facilitate the scanning of spatial images. *Journal of Mental Imagery*, **22**, 165-181.

Roland P., & Gulyás B. (1995). Visual memory, visual imagery, and visual recognition of large field patterns by the human brain: functional anatomy by positron emission tomography. *Cerebral Cortex*, **5**, 79-93.

S.

Sadato, N., Pascual-Lenone, A., Grafman, J., Ibanez, V., Deiber, M. P., Dold, G. & Hallett, M (1996). Activation of the primary visual cortex by Braille reading in blind subjects. *Nature*, **380**, 526-528.

Sakai K., & Miyashita Y. (1994). Visual Imagery: an interaction between memory retrieval and focal attention. *TINS*, *17* (7), 287-289.

Sampaio, E. (1989). L'Autisme Infantile : le Cas de l'Enfant Aveugle. Réflexions Méthodologiques. *Psychologie Médicale*, *21* (13), 2020-2024.

Sampaio, E., & Philip, J. (1991). Sensory and motor aspects of pseudoneglect, hemifield and hemispace in the tactile modality. *Brain and Cognition*, *16*, 74-82.

Sampaio, E. (1994). Le développement précoce des enfants aveugles : les travaux pionniers de Fraiberg. *Psychiatrie de l'Enfant*, *37*, 29-47.

Shepard, R and Cooper, L. (1982). *Mental images and their transformations*. Cambridge, MA: MIT Press, 1982.

Shepard, R.N., (1975). Form, formation and transformation of internal representations, in R.L. Solso, éd., *Information processing and cognition : the Loyola Symposium*, Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum Associates

Shepard, R. and Metzler, J. (1971). Mental rotation of three dimensional objects. *Science*. *171* (972), 701-703.

T.

Thinus-Blanc, C. Gaunet., F. (1997). Space representations in the blind: Vision as a spatial sense ? *Psychological Bulletin*, *121*, 20-42.

Thompson, W. L. Kosslyn., S. M (1998). Neural systems activated during visual mental imagery: A review and meta-analysis. In J. C. M. E. A.W. Toga (Ed.), *Brain mapping: The applications* . New York: Academic Press.

V.

Vanlierde, A., De Volder A., Wanet-Defalque M.-C. Veraart C. (2003). Occipito-Parietal Cortex Activation during Visuo-Spatial Imagery in Early Blind Humans. *NeuroImage*, *19*, 698-709.

Vecchi, T., Phillips, L. H., & Cornoldi, C. (2001). Individual differences in visuo-spatial working memory. In R. H. Logie., M. Denis, C. Cornoldi, M. de Vega, & J. Engelkamp (Eds.) (Ed.), *Imagery, language, and visuo-spatial thinking* (pp. 29-58). Hove: UK: Psychology Press.

Vecchi, T., Phillips, L.H., Cornoldi, C. (2001). Individual differences in visuo-spatial working memory. . In R. H. Logie., M. Denis, C. Cornoldi, M. de Vega, & J. Engelkamp (Eds.) (Ed.), *Imagery, language, and visuo-spatial thinking*, 47-58. Hove: Psychology Press.

Vecchi, T., Tinti, C. & Cornoldi, C. (2004). Spatial memory and integration processes in congenital blindness. *Neuroreport*, *15*, 2787-2790.

Veraart, C. & Wanet-Defalque, M-C.(1987). Representation of locomotor space by the blind. *Perception and Psychophysics*, **42**(2), 132-139.

Veraart C, De Volder A G, Wanet-Defalque M C, Bol A, Michel C, and Goffinet A M, (1990). Glucose utilization in human visual cortex is abnormally elevated in blindness of early onset but decreased in blindness of late onset. *Brain Research*, **510**, 115-121.

Viaud-Delmon, I., Sarlat, L. & Warusfel, O. (2004). Virtual Ventriloquism: Localization of Auditory Sources in Virtual Reality. *Proc CFA/DAGA*, Strasbourg.

Viaud-Delmon, I., Seguelas, A., Rio, E., Jouvent, R. & Warusfel, O. (2004). 3-D Sound and Virtual Reality: Applications in Clinical Psychopathology. *Cybertherapy*, San Diego.

Viaud-Delmon, I., Warusfel, O., Seguelas, A., Rio, O. & Jouvent, R. (2005). High sensitivity to multisensory conflicts in agoraphobia exhibited by virtual reality. *European Psychiatry*.

Von der Heyde, M. & Bühlhoff, H. H. (2000). *Perception and Action in Virtual Environments*. In Von der Heyde, M. & Bühlhoff, H. H. (Eds). *Perception and Action in Virtual Environments*, Max Planck Institute for Biological Cybernetics, Germany: Cognitive and Computational Psychophysics Department

W.

Wanet, M. C., Veraart, C. (1985). Processing of auditory information by the blind in spatial localization tasks. *Perception and Psychophysics*, **38**(1), 91-96.

Wanet-Delfaque, M. C., Veraart, C., De Volder, A., Metz, R., Michel, C., Doods, G. & Goffinet, A. (1988). High metabolic activity in the visual cortex of early blind subjects. *Brain Research*, **446**, 369-373

Warren, D.H. & Pick, H.L. (1970). Intermodality relation in blind and sighted people. *Percept Psychophys*, **8**, 430-432.

Warren, D.H. (1974). Early vs. Late Vision: The Role of Early Vision in Spatial Reference Systems. *New Outlook for the Blind*, **68**, 157-162.

Weeks, R., Horwit, B., Aziz-Sultan, A., Tian, B., Wessinger, C.M., Cohen, L.G., Hallett, M., & Rauschecker, J.P. (2000). A positron emission tomographic study of auditory localization in the congenitally blind. *The Journal of neuroscience*, **20**, 2664-2672.

Wiesel, T. N. & Hubel, D. H. (1965) Comparison of the effects of unilateral and bilateral eye closure on cortical unit responses in kittens. *J. Neurophysiol.* **28**, 1029-1040.

Wightman, F. L. & Kistler, D. J. (1999). Resolution of front back ambiguity in spatial hearing by listener and source movement. *Journal of the Acoustical Society of America*, **105**, 2841-2853.

Witmer, B. G., Bailey, J. H. & Knerr, B. W. (1996). Virtual spaces and real world places: transfer of route knowledge. *International Journal of Human-Computer Studies*, **45**, 413-428.