HAL
open science

Spatial navigation in real and virtual urban environments: performance and multisensory processing of spatial information in sighted, visually impaired, late and congenitally blind individuals

Yasmine Boumenir

To cite this version:

Yasmine Boumenir. Spatial navigation in real and virtual urban environments: performance and multisensory processing of spatial information in sighted, visually impaired, late and congenitally blind individuals. Interface homme-machine [cs.HC]. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2011. Français. NNT : . tel-00632703

HAL Id: tel-00632703

https://theses.hal.science/tel-00632703

Submitted on 14 Oct 2011

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.

Université de Montpellier II Sciences et Techniques

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE MONTPELLIER II

Ecole doctorale : Information Structures et Systèmes

Présentée et soutenue publiquement par

Yasmine BOUMENIR

NAVIGATION SPATIALE EN MILIEU URBAIN REEL OU VIRTUEL

Performances et traitement multi-sensoriel de l'information spatiale chez les voyants, malvoyants et aveugles congénitaux ou tardifs

Soutenue le 29 Septembre 2011 devant le jury :

Agnès MULLER	Examinateur	(PU) UM1, Montpellier, FRANCE
Gérard DUPEYRON	Examinateur	(PH) CHU, Nîmes, FRANCE
Etienne SAVE	Rapporteur	(DR2) CNRS, Marseille, FRANCE
Amadeo D'ANGIULLI	Rapporteur	Professeur, Université de Carleton, CANADA
Jean-Dominique POLACK	Rapporteur	Professeur, CNRS, Paris, FRANCE
Guy REBILLARD	Co-directeur de thèse	(CR1) INSERM, Montpellier, FRANCE
Birgitta DRESP-LANGLEY	Directeur de thèse	(CR1) CNRS, Montpellier, FRANCE

A travers cet écrit je remercie toutes les personnes qui ont contribué à ce résultat, Mon directeur de Thèse Mme Birgitta Dresp-Langley de m'avoir ouvert les portes du savoir et a éclairé ma voie par de multiples connexions neuronales me permettant ainsi d'enrichir mes connaissances spatiales. Mon co-directeur de Thèse Guy Rebillard pour ses prestigieux conseils et son soutien et toutes les personnes ayant permis mon insertion au sein du laboratoire et veiller à l'avancement de cette thèse notamment les personnes qui ont participé aux comités de thèse, à savoir Mr René Motro, Mr Bernard Maurin, Mme Jeanne Marie Barbéris, Mme Agnes Fichard-Caroll, Mr André Chrysochoos et Mlle Fanny George. Ainsi qu'aux personnels du LMGC, Mme Reine Bonnet, Mme Chantal romano, Mr Gilles Requile, Mr Thierry Vigo pour leur aide et leur soutien.

Je remercie également tous les membres du jury Mme Muller, Mr Dupeyron, Mr Save et Mr D'Angiulli ainsi que Mr Polack pour le temps consacré à la lecture avisée de ce travail de thèse.

Je remercie tout particulièrement tous les volontaires voyants, aveugles, malvoyants qui ont accepté de naviguer virtuellement ou réellement dans les rues de Paris ou de Montpellier. Ainsi que les personnes qui ont accepté de veiller pendant 24h pour les besoins de l'étude, mais qui ne verront pas leurs résultats illustrés dans cette thèse à cause du nombre réduit de l'effectif. Cette thèse m'a permis de faire de belles rencontres, Mr Verine et Mr Baradat ainsi que tous les membres de l'association AVH et l'union des aveugles, et Faycal Hamdi qui a conçu le site de l'expérience 2 et les concepteurs des plans tactiles interactifs Mme Catherine Bullat, Mr Michel Lazeyras de la « société ABAplans ». vVotre aide m'a été précieuse et je vous en remercie.

Enfin une grande pensée à mes parents qui ont cru en moi et m'ont aidé à réaliser mes rêves, le rêve de devenir immortelle. Et toute ma famille et mes ami(e)s pour leur présence.

A Mon cher époux qui tend toujours le fil quand il se relâche et mon bébé qui m'a aidé à réaliser combien la mémoire à court terme est importante pour le partage de nouvelles découvertes.

Résumé

Dans le cadre de cette thèse, nous avons mené trois études sur le terrain et/ou en laboratoire pour comparer l'importance relative de la géométrie des routes, représentée visuellement ou tactilement en deux dimensions, des informations multidimensionnelles extraites sur la base d'une visite directe du monde réel, et des informations symboliques indirectes sur les lieux par le biais d' instructions verbales, dans la construction de représentations spatiales chez l'homme, lui permettant de naviguer de mémoire dans des environnements complexes et non-familiers. Ces expériences ont permis de mettre en lumière certains aspects multidimensionnels et multi-sensoriels dans le traitement cognitif des informations spatiales et l'influence de celui-ci sur les performances d'hommes et de femmes, qui avaient pour tâche de retrouver de mémoire un itinéraire donné dans un milieu urbain non familier. Les résultats montrent clairement que des informations relatives aux repères visuels, transmises au moyen de séquences d'images panoramiques des itinéraires étudiés, sont inutilisables par un navigateur s'il ne dispose pas d'informations valides sur les distances relatives entre ces repères dans le monde réel (expérience 1). L'influence d'une exposition au préalable à un plan 2D visuel ou tactile des itinéraires a été comparé avec celle d'une expérience directe au moyen d'une visite guidée, ou indirecte au moyen d'indications verbales, sur les performances de navigation de personnes voyantes (expérience 1 et 2), déficientes visuelles (expérience 3), ou voyantes mais privées temporairement de leur vision (expérience 3) dans des environnements urbains à grande échelle. Les tests ont été réalisés en milieu réel (expériences 1 et 3) et virtuel (expérience 2) généré par ordinateur (*Google Street View*). Les performances ont été analysées en termes de temps du point de départ au point d'arrivée, nombre d'arrêts, nombre d'erreurs et taux de succès. Les stratégies potentiellement employées durant la navigation sont mis en avant sur la base des réponses des sujets à un questionnaire standardisé ; leurs capacités individuelles de se représenter l'environnement exploré sous forme d'images mentales a été évaluée sur la base de dessins. Les niveaux subjectifs de stress psychologique ont été mesurés pour mettre en évidences des différences possibles entre l'homme et la femme à cet égard. Les données ici montrent, d'une part, qu'une exploration rapide de représentations virtuelles correctement mises à l'échelle d'un environnement complexe permet aux sujets de retrouver cet itinéraire sans problème dans le milieu réel (expérience 2). Les personnes aveugles de naissance compensent l'absence de repères visuels dans la navigation efficacement par la mémorisation d'informations géométriques sur la base d'une brève exploration d'un plan tactile des itinéraires étudiés ici. Les sujets voyants privés de repères visuels, par contre, ne sont pas instantanément capables d'une telle compensation (expérience 3). Les résultats de ce travail sont discutés ici à la lumière des hypothèses actuelles sur la nature intrinsèque des représentations spatiales chez l'homme et placés ici dans le contexte d'un modèle de la mémoire de travail. Nous suggérons que cette dernière comprend des sous-systèmes multidimensionnels de stockage temporaire, capables de traiter en parallèle une multitude d'entrées sensorielles avec une capacité beaucoup plus grande que précédemment postulé dans le modèle classique de la mémoire de travail, qui présume un traitement sériel d'informations à capacité limitée. Un tel modèle est globalement mis en question par les résultats de cette thèse, qui ouvre une porte importante aux recherches futures sur le traitement cognitif d'informations spatiales chez l'homme dans un monde en perpétuel changement.

Discipline : Mécanique et Génie Civil

Mots-clés : Environnements à grandes échelles – perception – traitement multi-sensoriel – représentation spatiale – navigation – humain

Title: Spatial navigation in real and virtual urban environments: performance and multisensory processing of spatial information in sighted, visually impaired, late and congenitally blind individuals

Abstract

Previous studies investigating how humans build reliable spatial knowledge representations allowing them to find their way from one point to another in complex environments have been focused on comparing the relative importance of the two-dimensional visual geometry of routes and intersections, multi-dimensional data from direct exposure with the real world, or verbal symbols and/or instructions. This thesis sheds further light on the multi-dimensional and multi-sensorial aspects by investigating how the cognitive processing of spatial information derived from different sources of sensory and higher order input influences the performance of human observers who have to find their way from memory through complex and non-familiar real-world environments. Three experiments in large-scale urban environments of the real world, and in computer generated representations of these latter (*Google Street View*), were run to investigate the influence of prior exposure to 2D visual or tactile maps of an itinerary, compared with a single direct experience or verbal instructions, on navigation performances in sighted and/or visually deficient individuals, and in individuals temporarily deprived of vision. Performances were analyzed in terms of time from departure to destination, number of stops, number of wrong turns, and success rates. Potential strategies employed by individuals during navigation and mental mapping abilities were screened on the basis of questionnaires and drawing tests. Subjective levels of psychological stress (experiment 2) were measured to bring to the fore possible differences between men and women in this respect. The results of these experiments show that 2D visual maps, briefly explored prior to navigation, generate better navigation performances compared with poorly scaled virtual representations of a complex real-world environment (experiment 1), the best performances being produced by a single prior exposure to the real-world itinerary. However, brief familiarization with a reliably scaled virtual representation of a non-familiar real-world environment (*Google Street View*) not only generates optimal navigation in computer generated testing (virtual reality), but also produces better navigation performances when tested in the real-world environment and compared with prior exposure to 2D visual maps (experiment 2). Congenitally blind observers (experiment 3) who have to find their way from memory through a complex non-familiar urban environment perform swiftly and with considerable accuracy after exposure to a 2D tactile map of their itinerary. They are also able to draw a visual image of their itinerary on the basis of the 2D tactile map exposure. Other visually deficient or sighted but blindfolded individuals seem to have greater difficulty in finding their way again than congenitally blind people, regardless of the type of prior exposure to their test itinerary. The findings of this work here are discussed in the light of current hypotheses regarding the presumed intrinsic nature of human spatial representations, replaced herein within a context of working memory models. It is suggested that multi-dimensional temporary storage systems, capable of processing a multitude of sensory input in parallel and with a much larger general capacity than previously considered in terms of working memory limits, need to be taken into account for future research.

Keywords : Spatial representations - complex environments - sensory processing - cognitive mapping - working memory - navigation aids

INTITULE ET ADRESSE DU LABORATOIRE: Laboratoire de Mécanique et Génie Civil
UMR UM2-CNRS 5508
cc048 Place Eugène Bataillon
34095 Montpellier Cedex 5.

Tables des figures

P.15 1- Signaux et aides exploités dans l'activité du wayfinding
P.25 2- Les moyens de prise d'information qu'offre la technologie moderne pour localiser un endroit ou pour visualiser un itinéraire
P.30 3- Exemples de repères distinctifs et universellement connus de grandes villes du monde
P.37 4- Représentation schématique et, par soucis de simplicité, réductionniste de la manière dont l'homme acquiert des cartes cognitives de son environnement physique
P.41 5- Deux systèmes de génération d'environnements complexes
P.50 6- La version initiale du modèle de Baddeley et Hitch (1974)
P.51 7- Les différentes composantes et instances de traitement du sous-système « boucle phonologique »
P.53 8- La dernière version du modèle de la mémoire de travail selon Baddeley (cf 2003)
P.61 9- Représentation de la géométrie des parcours « simple » et « complexe » sur un plan 2D coloré et en cela différent du plan monochrome utilisé dans l'une des conditions de cette étude.
P.63 10- Une représentation du site web du cimetière du Père Lachaise à Paris (www.père-lachaise.com)
P.64 11- Les plans 2D des parcours simple (à gauche) et complexe (à droite)
P.67 12- Les tracés GPS individuels des parcours effectués par les participants des différents groupes.
P.83 13- Représentation virtuelle de rues du 15ième arrondissement à Paris générée au moyen de Google Street View.
P.85 14- Représentations sous forme de plans 2D des rues du 5ième arrondissement à Paris.
P.87 15- Exemples d'images relatives aux points de repère potentiels sur les parcours simple (en haut) et complexe (en bas).
P.93 16- Temps de navigation en secondes des hommes et des femmes dans les deux conditions de familiarisation ou d'exposition préalable (plan 2D ou expérience directe par visite virtuelle GSV). Les taux de réussite moyens pour chaque condition sont indiqués dans la légende.
P.96 17- Les tracés GPS individuels des parcours effectués par les participants des différents groupes. Les tracés pour différentes conditions de familiarisation, sur parcours simple (a) (panneau supérieur) et sur parcours complexe (b) (panneau inférieur), sont représentés.
P.99 18- Les images mentales externalisées sous formes de dessins pour les parcours imples et complexes pour les deux conditions d'étude, plan 2D visuel et expérience directe en milieu réel et virtuel. a) représente les dessins des participants en parcours simple, b) les dessins des participants en parcours complexe.
P.101 19- Choix de stratégies des participants. Chaque participant devait donner un ordre de priorité à une stratégie donnée. a) condition plan 2D en parcours simple en milieu GSV sur écran d'ordinateur. b) condition visite virtuelle unique en parcours simple en milieu GSV sur écran d'ordinateur. c) condition plan 2D en parcours complexe en milieu GSV sur écran d'ordinateur. d) condition visite virtuelle unique en parcours complexe en milieu GSV sur écran d'ordinateur.

P.103 20- Reconnaissance visuelle-spatiale des repères du parcours simple. Le nombre d'images de repères reconnues pour une condition de familiarisation ou d'exposition (plan/GSV) donnée et le nombre relatif à leur bon positionnement sur une carte 2D sont indiqués.
P.104 21- Reconnaissance visuelle-spatiale des repères du parcours complexe. Le nombre d'images de repères reconnues pour une condition de familiarisation ou d'exposition (plan/ GSV) donnée et le nombre relatif à leur bon positionnement sur une carte 2D sont indiqués
P.106 22- Illustration schématique des opérations de la mémoire de travail dans la navigation après exposition directe (A) ou après exposition à un plan 2D (B) avant la tâche.
P.117 23- L'outil développé par la société Suisse 'ABAplans' à Genève. Un plan tactile thermogonflé placé sur une dalle, relié à un ordinateur. Lorsque l'on touche une des rues du plan, son nom est indiqué verbalement.
P.120 24- Représentations sous forme de plans 2D les itinéraires simple (à gauche) et complexe (à droite) de notre étude sur le terrain dans un quartier de Montpellier.
P126 25- (a) Tracés GPS pour le parcours simple par condition de familiarisation et type de déficit.
P.128 25- (b) Tracés GPS pour le parcours complexe par condition de familiarisation et type de déficit.
P.130 26- (a) Images mentales externalisées sous forme de dessins après la phase de familiarisation (expérience directe ou plan tactile 2D ou indications verbales) ainsi que le nombre de réussites en parcours simple.
P.132 26- (b) Images mentales externalisées sous forme de dessins après la phase de familiarisation (expérience directe ou plan tactile 2D ou indications verbales) ainsi que le nombre de réussites en parcours complexe.
P.135 27- Stratégies jugées prioritaires en cours de navigation en parcours simple et modalités sensorielles utilisées en priorité par les participants de chaque groupe après familiarisation au moyen d'une expérience directe (a), d'un plan 2D (b), d'instructions verbales (c).
P.136 28- Stratégies jugées prioritaires en cours de navigation en parcours complexe et modalités sensorielles utilisées en priorité par les participants de chaque groupe après familiarisation au moyen d'une expérience directe (a), d'un plan 2D (b), d'instructions verbales (c).
P.147 29- Modèle de la mémoire de travail révisé (Boumenir, 2011) qui tient compte du traitement multi-sensoriel temporaire d'informations, dans des tâches de nature spatiale aussi bien que dans d'autres tâches cognitives. Ce modèle est inspiré du modèle de Baddeley (2003).

Table des tableaux

P.68 1-Les performances de navigation des participants ayant effectués les parcours simple et complexe (d'après Boumenir et al, 2010), représentées ici en fonction du sexe et des conditions de familiarisation avec le parcours avant navigation.
P.68 2-Statistiques descriptives (d'après Boumenir et al, 2010) relatives aux performances de navigation.

P.70 3-Statistiques descriptives relatives aux données des trois experts pour les parcours simple et complexe (d'après Boumenir et al, 2010).
P.70 4-Résultats des analyses de la variance (F de Snédecor) et de tests *post hoc* (t de Student) pour les conditions de navigation en parcours complexe (d'après Boumenir et al, 2010).
P.72 5-Résumé des stratégies signalées par les sujets après la navigation en parcours simple et complexe en fonction des différents types de familiarisation avec les parcours.
P.85 6-Résumé des caractéristiques physiques des itinéraires simple et complexe potentiellement critiques pour la navigation de mémoire.
P.89 7-Statistiques descriptives des paramètres de performance et des niveaux de stress psychologique, obtenus à partir des données individuelles des hommes et des femmes ayant effectué le parcours simple après familiarisation au moyen d'un Plan 2D, suivi du parcours complexe après familiarisation au moyen d'une visite virtuelle unique en GSV.
P.90 8-Statistiques descriptives des paramètres de performance et des niveaux de stress psychologique, obtenus à partir des données individuelles des hommes et des femmes ayant effectué le parcours simple après visite virtuelle en GSV, suivi du parcours complexe après exploration d'un Plan 2D.
P.91 9-Statistiques descriptives des estimations subjectives de stress psychologique des hommes et des femmes en fonction de l'âge dans les conditions du parcours complexe.
P.95 10-Tableau résumant les paramètres relatifs aux performances de navigation en milieu urbain réel à Paris en fonction de l'âge des sujets (tous des hommes) et de la complexité du trajet à retrouver (simple ou complexe).
P.98 11-Tableau résumant les paramètres relatifs aux performances de navigation en milieu urbain réel à Paris en fonction de l'âge des sujets (tous des hommes) et de la complexité du trajet à retrouver (simple ou complexe).
P.115 12-Les données individuelles concernant l'âge, le type de déficience visuelle et le mode d'acquisition. M : Malvoyants ; AN : Aveugle de Naissance ; AT : Aveugle tardif ; VYB : Voyants à qui on avait bandé les yeux.
P.119 13-Résumé des caractéristiques physiques des itinéraires simple et complexe potentiellement critiques pour la navigation de mémoire.
P.122 14- Les temps de navigation, distances parcourues et les nombres d'erreurs et d'arrêts sont répertoriés ici par individu, type de parcours (simple/complexe), type de déficit visuel (aveugle congénital/aveugle tardif) et par mode de préparation à la navigation, ou familiarisation préalable avec le parcours (visite guidée/plan tactile/instruction verbale).
P.123 15- Les temps de navigation, distances parcourues et les nombres d'erreurs et d'arrêts par individu, type de parcours (simple/complexe), type de déficit visuel (déficient visuel/voyant aux yeux bandé) et par mode de préparation à la navigation, ou familiarisation préalable avec le parcours (visite guidée/plan tactile/instruction verbale).
P124 16- Les temps de navigation moyens, les écarts-type et les minima et maxima sont répertoriés ici par type de déficit visuel (aveugle congénital/aveugle tardif/déficient visuel/voyant aux yeux bandé) et par mode de préparation à la navigation.

---------- **SOMMAIRE**

INTRODUCTION GENERALE……..…….…….....10

I.PERCEPTION DES ENVIRONNEMENTS COMPLEXES 15

I.1. Définitions de l'espace perceptif.....15

I.2. Espace perceptif et cognition spatiale.....16

II. NAVIGATION ET WAYFINDING 20

II.1. Historique…….....20

II.2. Modalités d'acquisition des connaissances spatiales…….24

II.2. 1. Modalités sensorielles…….25

II.2. 1.1. Modalités afférentes de nature intéroceptive……..…….....25

- proprioception
- système vestibulaire

II.2. 1.2. Modalités afférentes de nature extéroceptive…… ……..……...…...…...27

- vision
- audition
- toucher (sens tactile)

II.2. 2. Prise d'information directe sur la base d'indications verbales……..…29

II.2. 3. Prise d'information sur la base de nouvelles technologies…….....31

II.3. Stratégies de navigation…….....35

II.3. 1. Planification progressive basée sur points de repères……..…….....35

II.3. 2. Planification globale basée sur la géométrie des routes et les directions principales…….....37

II.3. 3. Stratégies mixtes basées sur la configuration des routes et points de repères…….....37

II.4. Facteurs en jeu dans le *wayfinding*…….....38

II.4. 1. Facteurs intrinsèques…….....38

- Sexe
- Age
- Expérience individuelle
- Handicap sensoriel

II.4. 2. Facteurs extrinsèques……..……...41

III. TRAITEMENT COGNITIF DES INFORMATIONS SPATIALES..... 43

III.1. Représentation cognitive d'environnements complexes réels……...……43

III.2. Représentation cognitive d'environnements complexes visualisés sur écran……..…….....46

III.3. Représentation cognitive et déficits visuels…….....48

III 4. Processus de traitement de l'information spatiale …….....50

III.4. 1. Encodage et externalisation des traitements …….....51

III.4. 2. La mémoire de travail……..……..53

- Propriétés générales de la mémoire de travail…….……..54

- Modèle théorique de Baddeley et Hitch (1974)…….....55

IV. APPROCHE EXPERIMENTALE..... …..61

- But général et méthodes employées

IV.1. **Expérience sur le terrain du cimetière Père Lachaise à Paris :** …….....61

Retrouver son chemin dans un environnement complexe non-familier après une brève familiarisation directe ou indirecte

IV.1. 1. MATERIELS ET METHODE……..67

IV.1. 2. RESULTATS……...……..72

IV.1. 3. DISCUSSION…….……..79

IV.2. **Expérience en laboratoire et sur le terrain à Paris utilisant *Google Street View* :** ….....83

Effets d'une brève exploration de l'outil virtuel sur les stratégies de navigation sur écran et en milieu urbain réel

IV.2. 1. MATERIELS ET METHODE……...……86

IV.2. 2. RESULTATS…….....96

IV.2. 3. DISCUSSION…….....112

IV.3. **Expérience sur le terrain dans les rues de Montpellier :** …….……...117

Représentation cognitive du milieu urbain sur la base d'informations tactiles ou d'indications verbales chez les personnes malvoyantes, aveugles et voyantes aux yeux bandés.

IV.3. 1. MATERIELS ET METHODE…….……..…….……121

IV.3. 2. RESULTATS……..…….....128

IV.3. 4. DISCUSSION……..…….....144

V. DISCUSSION GENERALE 148

VI. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES..... 155

VII. REFERENCES 159

VIII. ANNEXES……186

- tableaux Excel des données brutes des expériences
- *output listings* ANOVA
- liste des publications

S'orienter et trouver son chemin dans un environnement complexe est une tâche multi-sensorielle qui fait appel aux processus cognitifs du plus bas au plus haut niveau de traitement de l'information. Le traitement perceptif et cognitif des informations spatiales et leur encodage mnésique constituent un champ d'investigation fertile en sciences cognitives aussi bien qu'en sciences de l'information et des systèmes depuis bon nombre d'années. Comprendre les mécanismes perceptifs et cognitifs qui permettent à l'homme d'acquérir une autonomie et une expertise dans la navigation en milieux complexes naturels, comme celle des aborigènes d'Australie ou des nomades du Sahara, par exemple, représente encore largement un défi aux chercheurs et non seulement à ceux intéressés par la cognition spatiale humaine de manière générale, mais aussi ceux qui étudient la perception d'environnements complexes par des agents cognitifs, robots intelligents ou d'autres systèmes, que ce soit dans un contexte de terrain ou en laboratoire.

La perception de l'espace désigne les modalités sensorielles, qui permettent de localiser un objet dans l'espace. Ces modalités comprennent la vision, l'odorat et l'audition, qui sont opérationnels à distance de l'objet, mais aussi le toucher, dont l'expression nécessite un contact avec un objet. L'interaction directe, par expérience préalable ou immédiate, ou indirecte, au moyen des nouvelles technologies d'aide à la navigation, de l'individu avec son environnement met en jeu toutes les modalités sensorielles et génère les traitements perceptifs et cognitifs qui vont lui permettre de se représenter l'espace en question. Dans le cadre de cette thèse, on s'intéresse plus particulièrement à l'efficacité relative des modalités sensorielles visuelles et tactiles dans la formation de représentations cognitives d'un environnement complexe et dans l'élaboration de stratégies de navigation qui permettent aux individus de retrouver un chemin et de pouvoir se repérer, avec et sans aide ou expérience/apprentissage préalable.

Les stratégies perceptives et cognitives mises en jeu dans ce que l'on appelle dans la littérature consacrée (« *wayfinding* »), comme souligné auparavant par Passini (1996) fournissent une véritable clé de lecture des processus cognitifs sous-tendant la navigation en environnements complexes. Ces stratégies sont caractérisées par un

processus dynamique de résolution de problèmes spatiaux, prenant en compte une multitude de signaux et d'informations relatives aux routes, directions et repères d'un chemin ou itinéraire.

Le 29 Février 2008, un millier de personnes n'ont pas pu rejoindre le terminal de départ de leurs vols dans l'aéroport de Pékin, le plus grand aéroport dans le monde, et ont raté leur avion. Les conséquences générales et le coût économique d'un tel échec sont inestimables et il s'avère que les décideurs responsables de la conception de cet aéroport auraient sans doute profité de l'avis d'un psychologue-ergonome expert dans le domaine du *wayfinding* et ainsi pu éviter le pire. En ergonomie cognitive, le *wayfinding* correspond à une activité cognitive qui doit satisfaire trois critères de succès: 1) permettre à l'être humain de répondre avec la plus grande précision possible à la question « où suis-je ? » et ensuite 2) lui fournir les moyens de prendre une décision d'orientation et, enfin, 3) lui fournir une image mentale fiable de l'environnement dans lequel il évolue. En balade en forêt, à la recherche d'une pharmacie ou d'une boulangerie dans un environnement urbain, ou pour retrouver la route la plus courte d'un point de départ vers un point de destination, nos systèmes sensoriels reçoivent et doivent traiter les informations spatiales nécessaires dont certaines vont être par la suite stockées en mémoire, soit à court terme pour un usage immédiat, ou à long terme pour servir éventuellement ultérieurement. Les représentations issues de ces traitements constitueront ce que Tolman (1948) appelait les « cartes cognitives » de l'environnement qui nous entoure. Dans la partie théorique de cette thèse, nous fournirons dans un premier temps un bref aperçu de l'état de l'art sur la perception de l'espace, notamment sur les modalités de prise d'informations relatives à l'espace. Ces modalités médiatisent l'exploration directe de l'environnement pour la navigation, que ce soit sur la base d'indications verbales, de plans ou de l'utilisation des dispositifs de réalité augmentée, telle que le GPS ou des environnements réels rendus virtuels. Les différents types de connaissances spatiales acquises via ces modalités seront abordés par la suite.

Les capacités cognitives en jeu dans le *wayfinding* sont influencées par des facteurs liés à l'individu, à l'environnement, et à l'interaction entre les deux. Depuis le siècle dernier de nombreuses recherches expérimentales ont été réalisées dans le but de connaître le poids relatif des facteurs qui influencent les différences individuelles au

niveau des capacités à s'orienter dans des endroits non-familiers avec succès. Selon Thorndyke (1980), l'âge serait un facteur déterminant dans l'acquisition d'habilités spatiales. En effet, un enfant âgé de moins de 12 ans réussit moins bien les tests de visualisation et d'orientation qu'un adulte de plus de 20 ans. D'autres travaux, réalisés pour connaitre la différence entre les sexes, ont conduit à des résultats contradictoires et nous ne savons toujours pas aujourd'hui à quel niveau de traitement de l'information se situerait la différence, s'il y en a une. D'autres facteurs, intrinsèques et épigénétiques, liés à l'expérience de l'individu au cours de son développement, ou extrinsèques tel que le bruit et d'autres facteurs de contexte ou de stress semblent influencer la cognition spatiale. Des travaux récents ont montré que des mécanismes épigénétiques sont associés à une activation transcriptionnelle de gènes impliquant ainsi un remodelage de la chromatine dans les neurones du gyrus denté, qui sont impliqués dans l'encodage des souvenirs d'événements psychologiques stressants. Selon Reul & Chandramohan (2007) l'induction de ces gènes, silencieux jusque là, est nécessaire pour l'encodage des événements stressant dans la mémoire et la stimulation de processus d'adaptation dans le cas où ses événements se reproduiraient à nouveau. Nous reviendrons, dans la partie théorique, aux travaux relatifs à ces facteurs.

Les travaux de Tolman (1948) sur le concept des cartes cognitives (« *cognitive maps* ») ont montré que la représentation mentale d'un environnement physique complexe est possible sans apprentissage directe. Ainsi l'homme est capable d'inférer les directions et les relations et les distances qui lient différents points de l'espace sans avoir eu une expérience avec l'environnement au préalable. Nous vivons aujourd'hui dans des environnements de plus en plus complexes et en constante transformation et nous apprenons à faire confiance à des entrées de plus en plus visuelles. Les expériences en psychologie cognitive menées chez l'homme, ont montré que les cartes cognitives sont, en effet, construites largement sur la base de la perception visuelle (Warren & Strelow, 1984; Warren, Anooshian & Bollinger, 1973). Nous sommes alors amenés à nous poser la question de la construction de cartes cognitives chez les personnes aveugles de naissance et/ou malvoyantes. L'apparition de nouvelles technologies destinées aux voyants, malvoyants et non-voyants invite à évaluer leur impact sur la perception de l'espace et sur la formation des représentations mentales de l'environnement. Nous présenterons ici par la suite quelques travaux préalables qui ont permis d'ouvrir cette voie de recherche.

La carte cognitive est aussi une instance de traitement de l'information qui permet par la suite de stocker ces informations en mémoire à court, moyen et à long-terme. Des souvenirs de scènes complexes stockés en mémoire souvent nous permettent de retrouver notre chemin dans des environnements qui nous sont peu ou pas du tout familiers. Lorsque le stockage mnésique d'évènements résiste au temps, on parle de mémoire à long terme. Cependant, les informations traitées et exploitées dans le *wayfinding* ou la navigation ne sont pas systématiquement confiées à notre mémoire à long terme. Une multitude de signaux et d'indices utiles sur le moment est maintenue provisoirement dans les structures de la mémoire à court terme et condamnée à disparaître par la suite. La plupart des travaux partagent l'idée que la mémoire de l'homme fonctionne avec une certaine économie et de manière sélective, avec une zone de stockage à court terme qui sert de mémoire de travail provisoire, activée lors du traitement et du maintien d'informations nécessaires pour réaliser une activité complexe. Dans cette thèse, nous évoquerons parmi les modèles de la mémoire de travail seulement le modèle de Baddeley & Hitch (1974), qui représente actuellement la proposition théorique prédominante et, sans doute, la plus heuristique, avec des étapes bien distinctes mais en interaction constante pour rendre compte comment les processus de maintien à court terme d'informations multi-sensorielles peuvent dialoguer avec les processus de plus haut niveau, qui comprennent, dans le cadre de ce modèle, une instance de maintien à long-terme et une centrale de commande. Ce modèle présente la mémoire de travail comme un système bien hiérarchisé et s'articulant en trois systèmes, mais avec des interactions multiples. La centrale de commande coordonne deux systèmes esclaves : la boucle phonologique qui permet un stockage temporaire d'informations verbales, et le calepin visuel-spatial, qui assure le stockage temporaire d'informations visuel-spatiales. Ce dernier est directement impliqué dans la génération et la manipulation d'images mentales et de cartes cognitives. Nous allons aborder ce système de façon plus détaillé dans la suite de cette thèse, avec références à quelques travaux qui ont permis de mettre en évidence l'intérêt général du modèle.

La démarche expérimentale de cette thèse a été développée sur la base d'un certain nombre de travaux récents ayant étudié les performances d'individus, voyants et non-voyants, pour se déplacer, se repérer, ou localiser des lieux après une expérience directe, une série d'indications verbales, ou l'utilisation de plans 2D et plus récemment de dispositifs de visualisation 3D de la réalité augmentée. Une des questions majeures qui

sous-tendent les travaux de cette thèse est celle de l'impact réel et relatif de ces nouveaux outils sur les performances dans le *wayfinding*, en milieu non familier réel, ou dans un même milieu représenté en version virtuelle sur un écran d'ordinateur. Par exemple, la réalité augmentée donne-t-elle lieu à de meilleures performances de navigation qu'une visite guidée ou une simple lecture d'une carte 2D? Nous avons tenté de répondre à cette question dans une expérience de terrain au cimetière Père Lachaise à Paris (expérience 1), où nous avons comparé les performances de navigation sur la base d'une brève familiarisation en trois conditions séparées : par expérience directe, par plan 2D, et par dispositif de réalité augmentée. Dans la suite des travaux, nous étudions plus particulièrement les représentations mentales et la mémorisation à court terme d'informations essentiellement visuelles dans la navigation en milieu virtuel au moyen du dispositif (« *Google Street View »).* Les performances de navigation des participants, après un très bref apprentissage au moyen de cet outil ou au moyen d'une simple carte 2D, étaient ensuite évaluées en situation de navigation sur écran et en situation de navigation dans l'environnement urbain réel à Paris. Dans une troisième expérience, nous avons étudié les mécanismes cognitifs de compensation chez les personnes aveugles ou malvoyantes qui devaient retrouver leur chemin dans un environnement urbain réel non-familier à Montpellier, après avoir exploré un dispositif de réalité augmenté tactile ou après avoir reçu des instructions verbales. Nous terminons la présentation de cette thèse par une discussion générale et un aperçu des perspectives qu'ouvrent les travaux réalisés.

I.PERCEPTION DES ENVIRONNEMENTS COMPLEXES----------

...*I.1. Définitions de l'espace perceptif*

Depuis les réflexions d'*Aristote*, résumées dans son œuvre « *physis* », l'homme n'a cessé de s'interroger sur les relations entre l'espace physique qui l'entoure (monde « externe ») et la représentation mentale (monde « interne ») de cet espace. Conformément à la pensée d'*Aristote*, *Descartes* (1644) écrivait que l'espace n'existe pas en dehors de la conscience humaine, il n'est qu'une construction mentale. La différence qu'il y aurait entre l'espace et le corps humain compris dans celui-ci n'existerait donc que dans notre pensée. *Kant* (1781) définissait l'espace comme une forme propre aux êtres humains, et que sans condition subjective nous ne saurions recevoir les intuitions extérieures, c'est-à-dire être affectés par les objets, la représentation de l'espace ne signifie plus rien. Selon la pensée de *Galilée* et de *Newton*, l'espace est conçu de façon géométrique et mathématique et possède un certain nombre de propriétés : continu, infini, tridimensionnel, homogène et isotrope. Les objets situés dans cet espace répondent aux lois de la géométrie euclidienne. Cependant, de nombreux travaux ont amené à conclure en défaveur de l'espace strictement euclidien, qui ne « fonctionne » qu'à l'intérieur d'un système de raisonnement et d'analyse bien spécifique. La perception et l'expérience de l'espace au moyen de nos sens ne remplit pas les conditions d'infinité, d'unicité, ou d'homogénéité. L'espace est donc avant tout une donnée subjective de la perception humaine et de la prise de conscience de cette perception.

Piaget (1950) donne à l'espace une interprétation génétique fondée sur les interactions indissociables entre les activités dites « opératoires » et « formelles » du sujet et les propriétés de l'objet. L'espace serait relié à l'action ou aux actions coordonnées entre elles. Au cours du développement de l'être humain et selon les types d'actions opératoires et formelles en place à un moment donnée du développement ontogénétique, Piaget distingue différentes formes de structures spatiales, dont ce qu'il appelle l'espace perceptif. Cet espace est lié à la perception multi-sensorielle, dont la structuration ne fait pas intervenir exclusivement des perceptions en termes de sensations successives, mais toute une activité perceptive et surtout une coordination de cette activité avec le système sensori-moteur. Ceci consiste à établir les ressemblances

et différences entre les éléments perçus, aboutissant à la constitution de ce qu'il appelle « *schèmes perceptifs* ».

> *« … l'espace perceptif est essentiellement incomplet et déformé, par opposition à l'espace intellectuel toujours plus complet et dû à une connaissance toujours moins déformante »* (Piaget, 1972, page 181).

D'après *Lalande*, l'espace doit être considéré tel qu'il est perçu par l'homme et défini comme étant « *un milieu idéal caractérisé par l'extériorité de ses parties, dans lequel sont localisées nos perceptions et qui contient par conséquent toutes les étendues finies* » (Lalande, 1956, page 298). Lalande aussi parle d'un espace perceptif, qui est délimité et constitué par ce qui est perceptible à nos sens. Klein (1993) le caractérise comme « *ordinaire, à la base des perceptions et des comportements quotidiens* ». Selon Lalande, cet espace perceptif peut être défini par trois propriétés essentielles ; 1) se composant d'unités de plus petites tailles, comme les « lieux » ou « sous-espaces » à qui on peut définir une structure en deux plans, 2) possédant une structure topologique simple, 3) ayant trois dimensions : verticale, horizontale et transversale auxquelles correspondent respectivement les termes « dessus-dessous », « droite-gauche », et « devant-derrière ».

L'espace perçu par un individu diffère de ce que l'on appelle l'espace vécu. Il ne s'agit, dans le cas de ce dernier, plus d'un espace vu et/ou parcouru par un individu, mais plutôt d'un espace ressenti et mis en relation avec d'autres représentations. Selon Lalande, c'est l'imaginaire qui le construit, en s'appuyant sur différents facteurs sensoriels, mnésiques et sociaux, voir sur une forme de conscience collective de ce qu'est un « lieu », un « paysage » ou une « ville », par exemple.

I.2. Espace perceptif de la cognition spatiale

On comprend, sur la base de ces réflexions de base, pourquoi dans nos interactions avec le milieu environnant la perception occupe un statut particulier et primordial. Elle trie et interprète presque instantanément et sans effort apparent les informations nécessaires à la formation de représentions internes et à la reconstruction mentale des lieux permettant la planification d'actions.

Grâce à ces processus cognitifs, les informations acquises de l'espace perceptif et surtout celles qui ont attirées notre attention vont être sélectionnées, encodées et hiérarchisées pour être utilisées. Le système cognitif humain (perception, mémoire, planification de l'action) réalise donc une mise en correspondance de représentations de l'espace pour l'exploitation de ces dernières dans le contexte d'un problème ou d'une tâche donnée, comme par exemple, localiser un objet dans l'espace, estimer sa position relative par rapport à d'autres objets, ou aller d'un point A vers un point B en suivant un itinéraire plus ou moins complexe.

Dans les 30 dernières années, la psychologie cognitive a vu l'émergence de la cognition spatiale comme étant un nouveau domaine destiné à tenir compte du comportement spatial en termes de mécanismes sous-jacents et des représentations qui en résultent (Siegel & White, 1975). La cognition spatiale désigne la faculté mentale de se représenter l'espace et de manipuler ces représentations spatiales. Ceci comprend l'acquisition, l'organisation et l'exploitation d'une multitude d'informations perceptives et symboliques. Ces capacités permettent à l'homme de réaliser des tâches cognitives des plus simples au plus complexes.

Effectuer une tâche cognitive complexe telle que la navigation spatiale, met en jeu une interaction intime entre le corps et l'espace perceptif et ses sources génératives. Plusieurs travaux ont permis de déceler différentes formes de représentations de l'espace issues de cette interaction. D'après les travaux de Tversky *et al* (1999), il existe essentiellement trois grands terrains de la cognition spatiale. Pour chacun de ces terrains, l'espace donné est source de stimulations multiples nécessitant une coordination inter-sensorielle. Le premier terrain est celui de l'espace corporel, que nous pouvons ressentir directement et donc celui de nos propres sensations et actes. Le second terrain est constitué par l'espace autour de nous, qui fait référence à l'environnement que nous sommes capables de toucher directement et de voir sans nous déplacer. Dans cet espace, l'observateur perçoit des objets, les relations entre objets, et aussi la position de ces objets par rapport à lui-même. Enfin, le terrain de l'espace dans lequel nous pouvons nous déplacer constitue ce que l'on appelle l'espace de navigation, qui est tellement vaste qu'il ne peut être perçu d'un seul regard ou en une seule image. L'espace de navigation est donc un espace à moyenne, grande, voir très grande échelle et nécessite une intégration cognitive de multiples signaux perceptifs et d'informations symboliques (géométriques et autres). Il nécessite le déplacement pour être exploré et appris.

Montello (1993) présente un classement des espaces qui est proche de la démarche et des objectifs de Tversky (1991), mais avec une distinction entre quatre classes d'espaces cognitifs. Ces espaces sont définis par rapport au corps de la personne qui se déplace. Le premier, l'espace « *figural* » selon Montello est défini comme plus petit que le corps de la personne et comprend donc tous les petits objets autour de la personne. Il peut être appréhendé auditivement, visuellement, olfactivement et tactilement et sans aucun déplacement. L'espace « *vista* » est plus grand que le corps de la personne mais peut être également perçu sans déplacement. Il englobe l'ensemble de l'environnement pouvant être vu, mais non nécessairement touché ou senti. L'environnement perçu à l'aide de déplacements seulement est nommé l'espace « *environnemental*» selon Montello. Dans cet espace on retrouve les habitats proches, les quartiers et les villes, par exemple. Enfin, l'espace que Montello appelle « *geographique* » nécessite l'utilisation d'une représentation externe telle qu'une cartographie ou un GPS (« *Global positioning system* ») et ne peut être appréhendé dans son intégralité par le déplacement. Une région, un pays ou un continent font partie de l'espace « *geographique*».

Il convient de rajouter deux autres formes d'espace à celles définis par Montello (1993), qui seraient l'espace des *« entités non-manipulables »* et l'espace des *« cartes géographiques »*. Ces espaces ont été définis grâce à des travaux de comparaison, réalisés sur les différentes catégorisations de l'espace proposées dans la littérature (Freundschuh & Egenhofer, 1997). L'espace des « *entités non-manipulable »* se situerait quelque part entre l'espace *« figural »* et l'espace *« vista »* et contiendrait des entités telles que des maisons et des arbres, par exemple. L'espace des *« cartes géographiques »* est défini par l'ensemble des données géographiques représentées par cartes actuellement disponible.

Afin de qualifier l'étendue ou l'échelle spatiale relative d'un environnement, les travaux de Garling & Golledge (1989) font la distinction entre trois types d'espace. Le premier, appelé *«espace à petite échelle »*, est l'espace dont la taille est comparable à celle de la pièce d'un bâtiment, par exemple, et peut être perçu sans effectuer de déplacement. L'intérieur de toute une maison est considéré comme un *« espace à échelle moyenne »*, tandis que les espaces plus importants et surtout ceux dont la taille ne permet pas de naviguer à vue sont considérés comme des *« espaces à grande échelle»*.

De manière générale, la capacité de l'homme à comprendre et à interagir avec la plupart de ces espaces repose essentiellement de leur accessibilité à la perception et à l'analyse spatiale. Ces interactions entre le système cognitif de l'homme et les espaces qui lui sont accessibles diffèrent, de ce fait, d'un individu à un autre. Elles sont fonctions de son expérience, son origine culturelle, sa motivation et ses buts, son âge et de ses facultés sensori-motrices. Nous allons, dans le chapitre suivant, résumer les résultats d'études scientifiques portant sur quelques uns de ces facteurs, qui vont faciliter ou, au contraire, rendre plus difficile la représentation mentale d'un espace donné. La fiabilité des représentations spatiales relatives aux lieux et aux itinéraires des espaces à large échelle détermine notre capacité de naviguer et de retrouver notre chemin, surtout lorsqu'il s'agit d'espaces qui nous sont non-familiers.

II. NAVIGATION ET WAYFINDING----------

II.1. Historique et définitions

Depuis ses origines, l'homme s'est orienté pour naviguer en utilisant les repères de son environnement naturel, comme la position du soleil dans le ciel, la lumière du jour et les ombres, ou encore la position des étoiles dans la nuit. Le besoin inné de l'homme de bouger et de maîtriser au mieux l'espace dont il dispose l'a conduit à développer des compétences mentales et des outils physiques lui permettant de se déplacer et de voyager vers des endroits lointains et non-familiers. Ainsi, Christophe Colombe a pu découvrir l'Amérique et Jules Dumont d'Urville la Terre d'Adélie.

Le terme « navigation » évoque des significations multiples et, au sens le plus général, désigne l'action de naviguer dans l'espace physique (terre, mer et air), à pied ou au moyen d'un véhicule et à l'aide des sens et/ou des différents outils d'aide à la navigation disponibles. Ces derniers comprennent les cartes et plans géographiques, les boussoles et de nos jours les systèmes de GPS ou encore les environnements virtuels comme (« *Virtual Field Trip »)* (VFT), développé par la NASA, ou *Google Street View*, par exemple. Ces systèmes de réalité virtuelle, parfois référencés sous le terme de « *réalité augmentée* », mettent en jeu des apprentissages et interactions homme-machine complexes. On se limitera dans le cadre de cette thèse à la navigation en milieu urbain non-familier à échelle moyenne et à l'aide d'outils spécifiques, qui comprennent des cartes géographiques en deux dimensions (plans 2D), des environnements virtuels disponibles sur le Web, et un dispositif spécifique d'aide tactile à la navigation en milieu urbain (plan de rues représentées en relief), qui a été développé récemment pour les malvoyants et aveugles par la société Suisse « *ABA-plans* ».

Du fait de l'importance fondamentale de la navigation pour l'homme, particulièrement en milieu naturel ou urbain, une riche collection de termes et de concepts a été introduite dans la littérature consacrée, notamment celui du *wayfinding*. Il s'agit là d'un mot qui n'est pas répertorié dans les dictionnaires de la langue anglaise, mais la fréquence d'utilisation du terme dans la littérature de la psychologie expérimentale et surtout environnementale et de la géographie a conduit certains à suggérer qu'il serait

raisonnable de le rajouter au lexique (cf Golledge, 1999). Il a été introduite par l'urbaniste Kevin Lynch (1960), qui le défini dans son livre *(« Image of the city »)* comme étant l'utilisation et l'organisation des informations sensorielles issues de l'environnement externe. Selon Golledge (1999, page 24), le *wayfinding* se réfère aux capacités cognitives et comportementales de l'homme et de l'animal leur permettant de retrouver le chemin depuis un point d'origine vers une destination donnée. Dans d'autres travaux, ce terme a été défini comme un déplacement déterminé vers une destination spécifique lointaine qui ne peut être perçu directement par le voyageur (Baker, 1981; Blades, 1991; Gärling, Böök &Lindberg 1984; Gluck, 1991; Golledge, 1992; Heft, 1983). Gluck (1991) voyait le *wayfinding* essentiellement comme une série de processus de décision, mis en œuvre pour s'orienter et naviguer dans un environnement complexe de manière séquentielle, « d'un point à l'autre » et sans faire d'erreurs.

Chacun d'entre nous a fait l'expérience de se retrouver désorienté et incapable de bien se représenter l'endroit dans lequel on se trouve, d'incertitude sur la direction à choisir pour trouver l'endroit recherché, et de l'angoisse d'être perdu. Ceci se produit lorsque les processus cognitifs mis en jeu dans le *wayfinding* ont échoué. L'interaction permanente entre l'homme et son environnement subit des variations à court terme, liées à la vigilance du navigateur ou à un détournement temporaire de l'itinéraire, par exemple, et des variations à long terme, liées à l'augmentation des temps de traitement de l'information avec l'âge ou un changement dans l'aménagement permanent d'un quartier ou d'une ville, par exemple. Cependant, selon Lynch (1960, page 3), il serait rare de se perdre complètement dans une ville moderne, car nous sommes rassurés et soutenus par la présence des autres d'une part et, d'autre part, par des dispositifs d'aide tels que les plans, les numéros de rue, ou les panneaux de direction (voir la Figure 1 ci-dessous).

Dans son livre (« *Wayfinding In Architecture »)*, Passini (1984, page 53), architecte et psychologue de l'environnement, a définit le *wayfinding* comme l'acte de résoudre des difficultés rencontrées dans l'espace. Il a enrichit la définition de Lynch en tenant compte du rôle de la signalétique, de la communication verbale, auditive, et tactile ainsi que des diverses méthodes graphiques particulières mises en œuvre pour

l'aménagement logique de l'espace, adapté aux besoins de l'individu et l'aidant à se déplacer dans un environnement complexe et non-familier.

***Figure 1*: Signaux et aides exploités dans l'activité du wayfinding** *: « Smashing Magazine » avec plan guide du quartier affiché sur un grand panneau (gauche), panneau d'indication de lieu et de direction (milieu) et panneaux de direction avec les noms et les numéros des rues (droite).*

Pour l'individu qui se déplace, la résolution de problèmes concerne sa capacité d'obtenir, d'encoder et de traiter les informations disponibles sur l'environnement, tandis que pour l'architecte ou l'urbaniste, elle concerne la capacité de réfléchir sur ce qu'il faut faire pour rendre l'environnement plus compréhensible.

Selon d'autres travaux, le *wayfinding* serait un processus de sélection qui consisterait à choisir un chemin particulier à partir d'un réseau (Bovy & Stern 1990). Quand un enfant s'estime assez grand pour aller tout seul à l'école, les parents veilleront à sélectionner le parcours qu'ils estiment le moins dangereux afin que leur enfant puisse naviguer seul avec une sécurité optimale, par exemple. Aussi, comme un tel parcours correspond rarement à une ligne directe de la maison à l'école, ils vont préférer sélectionner un chemin qui comporte des repères utiles pour permettre à leur l'enfant de se rappeler où il faut tourner et quelle direction prendre. Par la suite, il apprendra d'autres repères qui vont lui permettre de contrôler la distance déjà parcourue et d'estimer le temps qu'il faudra pour faire reste du trajet, par exemple. La sélection d'un parcours qu'on sera amené à emprunter tous les jours pour aller quelque part est donc un processus complexe en soi, basé sur des critères de choix multiples et variables selon les individus. Passer de chemins connus vers d'autres, mal ou non encore inconnus, est tout

à fait naturel et fait partie des grands apprentissages de la vie, de l'aventure humaine. En reprenant l'exemple de l'enfant, il est tout à fait évident qu'il tentera tôt ou tard d'emprunter un chemin différent de celui qui lui a été appris par ses parents pour rentrer de l'école. A ce moment, l'enfant naviguera en véritable mode *wayfinding*. L'envie de nouvelles expériences, la curiosité, la distraction et la soif d'aventure sont la base même de la motivation de tout déplacement. Se perdre est une expérience humaine universelle qui forge le caractère des hommes et des femmes et les amène à se mettre en question et à surmonter leurs propres limites (Hill, 1998; Montello, 1998).

Se familiariser avec un itinéraire ou un environnement nécessite plus que des informations indirectes sur les lieux. Pour bien apprendre un parcours, il faut à un moment ou autre passer par l'expérience directe. Les études de psychologie expérimentale relatives au processus d'apprentissage d'un parcours ou itinéraire ont soulevé bien des questions sur la façon d'apprendre comme, par exemple, si cet apprentissage passe nécessairement par la répétition d'actions, ou comment le déplacement est structuré dans l'espace mental de l'individu. A la question de la représentation mentale des actions de déplacement par rapport aux lieux s'est rajoutée celle des stratégies d'exploitation de repères et de l'intégration des parties locales d'un parcours et des étapes successives de déplacement en une représentation globale d'itinéraire. A toutes ces questions s'ajoutent celles relative aux modalités sensorielles, à savoir par quelles entrées sensorielles et par quels mécanismes de décodage et d'intégration passe l'acquisition des connaissances spatiales. Il semble raisonnable de penser que de multiples voies sensorielles coopèrent dans l'apprentissage de l'espace, permettant ainsi la formation de représentations stables chez l'homme doté de toutes ses facultés aussi bien que chez les individus atteints d'une déficience sensorielle particulière.

D'après Passini (1984, page 89), toute difficulté, qu'une personne peut rencontrer lors du *wayfinding* est liée à une certaine phase bien spécifique de traitement de l'information. Les travaux relatifs à l'analyse des erreurs par rapport aux différentes phases de traitement de l'information spatiale ont montré que, lors de la phase du traitement perceptif, par exemple, des erreurs d'encodage peuvent engendrer une mauvaise appréciation de la vitesse, du temps de parcours, ou encore de la distance parcourue ou à parcourir, se traduisant par une sous estimation ou une surestimation des

paramètres (Böök & Gärling, 1981b; Cadwallader, 1977, 1979). Des erreurs d'encodage perceptif liées à une déformation du cadre de référence peuvent engendrer des jugements erronés d'orientation ou de direction (Gärling *et al*, 1986b; Presson *et al*, 1987, 1989). Au niveau du décodage des représentations ou cartes cognitives, on observe parfois la mise en œuvre incorrecte d'une propriété correctement encodée, comme un angle de virage, une distance ou un ensemble de relations spatiales (Hill *et al*, 1993; Lloyd, Cammack, & Holliday 1996). Souvent, ces erreurs de *wayfinding* résultent d'une manipulation interne impropre liée à l'intégration inadéquate des routes et intersections en une configuration ou représentation d'ensemble (Golledge *et al*, 1993). La reconnaissance et l'identification de repères sur un parcours est un aspect important du *wayfinding*. Il a été observé que des changements de perspective (Bryant & Tversky 1991; Cornell, Heth & Rowat 1992) ou une familiarité insuffisante (Gale *et al*, 1990) peuvent compromettre la reconnaissance de repères. Finalement, toute erreur de navigation peut remonter à une erreur d'encodage perceptif, basé sur une ou plusieurs modalités d'acquisition de la connaissance spatiale. Ces différentes modalités d'acquisition forment la base de tout traitement cognitif ultérieur. Un encodage fidèle de l'information lors des étapes les plus précoces de traitement est donc une *conditio sine qua non* de la réussite du processus de *wayfinding.*

II.2. Modalités d'acquisition des connaissances spatiales nécessaires

(« *Information is a difference which makes a difference »)* – Bateson, (1972, p. 459)

Tout navigateur a besoin de connaissances de différentes natures acquises au moyen de différentes modalités, souvent complémentaires. La prise de connaissance peut s'effectuer de façon directe, par exploration au moyen de notre système sensori-moteur. Elle peut se réaliser à partir d'informations indirectes sur la base de plans et cartes, passant le plus souvent par la vision, mais aussi par le toucher et le langage. Ainsi, l'homme doit être capable de mettre en relation des informations sensorielles et symboliques internes avec des informations physiques externes pour bien apprendre à connaître son environnement. Il convient de mentionner ici que le langage constitue un véhicule tout à fait majeur d'information sur l'espace et peut-être le moyen le plus fréquemment employé par l'homme dans la vie courante pour planifier un déplacement

ou pour voyager vers un environnement inconnu. Cependant, l'homme de la préhistoire avait appris à se déplacer, à retrouver son chemin et à rentrer de la chasse d'endroits parfois lointains bien avant qu'il n'ait appris à parler. La première et plus importante source d'informations pour la connaissance spatiale est donc bien celle que représentent nos sens.

II. 2. 1. Modalités sensorielles

Nos systèmes sensoriels se développent d'abord séparément, puis se coordonnent à un moment donné de l'ontogenèse pour permettre à l'homme de générer des actions toujours plus adaptées à son espace, dont les dédales font progressivement place à une structure cohérente et stable par le biais de l'exploration (Piaget, 1936). Réciproquement, l'acte moteur représente une source de variation qui stimule les organes sensoriels et qui permet d'appréhender non seulement la structure de l'environnement extérieur, mais aussi les propriétés de l'organisme qui en est à l'origine. L'acquisition des connaissances spatiales se fait au moyen de notre perception, qui au sens large peut-être définie comme « *le processus d'extraction d'informations à partir d'une large gamme d'énergies physiques qui stimulent nos sens* » (cf Forgus, 1966, page 7). L'interprétation de ces informations en termes de messages informatifs que le système nerveux peut exploiter est appelé « *mécanisme de transduction sensorielle* ». Chaque modalité sensorielle dispose de mécanismes de transduction qui lui sont propres.

II.2.1.1. Modalités afférentes de nature intéroceptive

Les organes sensoriels de nature intéroceptive sont appelés aussi « sens de profondeur ». On y retrouve le sens kinesthésique, qui transmet des changements dans la position du corps et le mouvement des muscles et des tendons, et le sens vestibulaire, ou encore dit « statique », qui transmet les changements dans l'équilibre du corps. (cf Forgus, 1966).

Proprioception

La proprioception désigne l'ensemble des récepteurs, voies et centres nerveux impliqué dans ce que l'on appelle la sensibilité profonde, ou encore la perception de la position des différents membres de son corps propre et de leur tonus, en relation avec la situation du corps par rapport à l'intensité de l'attraction terrestre. La proprioception peut se traduire par des sensations conscientes, ou ne pas remonter au niveau conscient (Delmas, 1981). La relation entre proprioception et navigation peut être illustré à l'exemple de la notion d'effort. Certains parcours demandent plus d'efforts que d'autres et cet effort est souvent perçu comme ayant des caractéristiques bien particulières. Les sportifs de très haut niveau utilisent la mémoire des efforts fournis lors d'un parcours pour apprendre à gérer leur énergie et à préparer une compétition, par exemple. Ainsi, le sportif de haut niveau est capable d'acquérir une connaissance spécifique d'un itinéraire ou parcours sur la base de la nature de l'effort fourni et parvient à reconnaître le parcours sur la base de cette « mémoire de l'effort ».

Système vestibulaire

Le système vestibulaire est une partie de l'oreille interne qui contribue à l'orientation et la localisation du corps dans l'espace après déplacement en informant en permanence le cerveau sur les mouvements et sur la position de la tête et du corps. Si ce système est lésé, l'équilibre, le contrôle des mouvements oculaires lors des mouvements de la tête ainsi que le sens de l'orientation spatiale seront perturbés.

L'implication du système vestibulaire dans les mécanismes de la cognition spatiale a été décrite chez l'animal et chez l'Homme dans de nombreux travaux (Beritoff, 1965 ; Potegal, 1982; Lopez *et al*, 2005; Wiener & Berthoz, 1993). Beritoff a été le premier à rapporter que les animaux (chiens et chats) étaient capables de retourner les yeux bandés à leur point de départ après y avoir été transportés de façon passive, mais uniquement si leur système vestibulaire est intact, poussant à conclure que l'organe vestibulaire est requis pour la navigation dans le noir. Il a aussi été observé que des

enfants sourds-muets, présentant une lésion vestibulaire, à qui on avait bandé les yeux ne pouvaient emprunter le même chemin pour arriver au point de départ, or, les enfants n'ayant pas de déficience vestibulaire pouvaient le faire. Ces résultats ont été confirmés par Miller (1983) chez le rat. Dans le système vestibulaire, Lacour & Gustave Dit Duflo (1999) considèrent les noyaux vestibulaires comme « *un centre prémoteur et préperceptif d'intégration d'informations spatiales* ». Tandis que, les structures corticales vestibulaires feraient partie de réseaux neuronaux impliqués dans l'élaboration de représentations internes des espaces personnels « *référentiel spatial égocentré* » et extra-personnels « *référentiel spatial allocentré* » (Lopez *et al*, 2005, Berthoz, 1991; Andersen *et al*. 1993). Dans le référentiel spatial égocentré, les positions des objets sont déterminées par rapport au corps du sujet lui-même, or, dans un référentiel spatial allocentré, la position des objets dans l'environnement est en fonction de leur configuration spatiale et est indépendante du sujet. Selon Paillard (1991) ces deux référentiels dériveraient d'un « *référentiel spatial géocentré* » ou gravitaire. Ce dernier conditionne notre perception de l'orientation de notre corps et des objets de l'environnement indépendamment de leur position et de ce fait considéré dans le système nerveux comme le seul cadre de référence absolu (Lopez *et al*, 2005).

II.2.1.2. Modalités afférentes de nature extéroceptive

Vision

La vision est la résultante du traitement d'une partie de l'énergie lumineuse par la rétine et par le système nerveux central qui permet de former des images de ce qui nous entoure. Elle joue un rôle tout à fait primordial dans notre rapport à l'espace. La vision est le système sensoriel le plus utile et fonctionnel dans le traitement de l'information spatiale. Elle constitue pour beaucoup la « modalité par excellence » par laquelle l'espace est appréhendé. Les premiers travaux de Johansson (1950) avaient montré que le système visuel perceptif pouvait très rapidement identifier les gestes humains, même si l'information apportée était très appauvrie, se réduisant à quelques points lumineux placés au niveau des articulations des membres. La visualisation de ces points lumineux en séquences de mouvements (film) permettait d'identifier, au bout de quelques centaines de millisecondes (Johansson, 1973) la nature du geste, le genre de la personne

effectuant le geste (Kozlowski & Cutting, 1978), ou encore les caractéristiques des objets manipulés au moyen du geste (Runeson & Frykholm, 1981).

La perception visuelle ne consiste pas en une analyse purement passive d'un ensemble d'images projetées sur une sorte d'écran intérieur (la rétine). Elle s'élabore grâce à une exploration active de l'environnement et effectue une véritable reconstruction du monde perçu en une sorte de modèle hypothétique qui ressemble au monde réel (Boisacq-Schepens & Crommelinck, 2000). La Perception visuelle repose sur un ensemble de mécanismes psychophysiologiques qui permettent de reconstruire les attributs et les qualités des objets et les événements présents dans notre environnement. Parmi eux, il y a le mouvement, la taille, le relief et la brillance, qui permettent l'identification et la reconnaissance des objets visuels et leur localisation dans l'espace.

Audition

Le système auditif permet de capter et d'analyser l'énergie sonore et intervient dans la perception de l'espace dans la mesure où elle permet de localiser des sources sonores avec une grande précision et d'apprécier les distances entre sources. En ce sens, on peut parler d'un espace sonore. L'audition joue un rôle sans doute secondaire par rapport à la vision, mais cependant non négligeable. Les études sur les enfants sourds précoces montrent qu'ils ont de réelles difficultés à concevoir un espace continu, c'est à dire un espace qui ne se réduit pas à ce qui entre dans le champ de leur vision. L'audition participe ainsi à la perception de la continuité et du relief de l'espace qui nous entoure (Dumont, 1995).

Toucher

Le champ perceptif tactile est plus exigu que le champ visuel. Comme il est limité à la zone de contact entre notre peau et l'objet physique, beaucoup de mouvements doivent être effectués pour l'agrandir, ce qui rend la perception tactile beaucoup plus lente et successive que la perception visuelle. La taille de ce champ perceptif peut varier selon

le fait que le sujet mobilise un doigt seulement, la main entière, ou les deux mains et les bras. Dans leur études sur l'exploration perceptive manuelle, Lederman & Klatzky (1987, 1993) et Lederman *et al*, (1993) ont montré que des mouvements spécifiques doivent être produits selon les propriétés spécifiques de l'objet qu'on cherche à connaitre. Chez l'adulte, le mouvement tactile le plus adapté à la perception de la texture est le balayage latéral par frottement de la structure avec l'extrémité des doigts. Le toucher est susceptible de renseigner l'individu sur les relations spatiales entre objets directement en contact avec lui ou se trouvant dans son espace corporel. Des études sur le traitement spatial chez les sujets aveugles ont été réalisées (Thinus-Blanc & Gaunet, 1997; Picard & Pry, 2009) pour évaluer la capacité des sujets aveugles à identifier et à se représenter les relations spatiales sur la base d'informations tactiles, proprioceptives et vestibulaires. Ces études ont mis en évidence le fait que la modalité tactile en particulier permettait une appréhension tout à fait fonctionnelle de l'espace et de ses propriétés. Un certain nombre d'études évoquent l'hypothèse selon laquelle la vision ne serait pas un pré-requis indispensable de l'acquisition des concepts spatiaux. Röder & Rösler (1998) ont proposé à des personnes non voyantes de naissances et à des personnes voyantes privées de vision temporairement une tache d'exploration mentale de configurations au moyen du toucher. Les résultats montrent que cette modalité sensorielle permettait aux deux groupes de traiter les données métriques des configurations de manière adéquate et avec des temps de réponse tout à fait similaires.

II.2. 2. Prise d'information directe sur la base d'indications verbales

Beaucoup d'espèces animales possèdent la capacité de naviguer dans l'espace, mais il ya certaines caractéristiques d'ordre supérieur, tels que la capacité de communiquer verbalement des informations spatiales, qui sont typiquement humaines. La communication verbale aide la personne désorientée à se localiser dans l'espace et à retrouver sa destination. Plusieurs travaux ont été menés pour avancer la compréhension des tâches d'orientation spatiale à l'aide d'indications verbales (Barbéris & Manes-Gallo, 2007; Denis, 1997a; Couclelis, 1996; Giudice *et al*, 2007). Par exemple, quand les Anglo-Saxons sont appelés à décrire des environnements, ils adoptent un de trois styles décrits par Taylor & Tversky (1996). Dans des environnements de petite taille, qui peuvent être perçus à partir d'un seul point de vue, les gens utilisent un seul point de

vue dans l'environnement, habituellement une entrée, et décrivent des repères, typiquement des objets dans une chambre, relatifs à d'autres en terme de droite, gauche, en face, derrière par rapport au point de vue original (Ehrich & Koster, 1983). Quand il s'agit d'environnements de grande taille, qui ne peuvent être perçus à partir d'un seul point de vue, les gens optent pour une description globale, basée soit sur une configuration globale ou sur la géométrie des routes, soit sur les deux descriptions (Denis, 1996; Tversky *et al*, 1997). Dans la description basée sur la configuration globale, les gens prennent un point de vue d'en haut « vue d'oiseau » et décrivent des repères, relatifs l'un à l'autre en terme de système de référence extrinsèque, sur l'axe nord-sud, est-ouest. Dans la description des routes, les gens prennent les points de déplacement du navigateur, typiquement caractérisés par « lui » dans un environnement, et décrivent la localisation des repères relatifs à sa position actuelle en termes de sa droite, gauche, face et arrière (Taylor & Tversky, 1996). L'homme utilise fréquemment ces deux modes simultanément. La configuration de l'environnement joue un rôle important dans le choix du mode de description. Par exemple, la description basée sur la configuration est relativement plus populaire chez les Anglais pour les environnements qui contiennent des routes multiples ou des repères à échelles multiples (Taylor & Tversky, 1996). Ces trois perspectives correspondent aux trois cadres de références distingués par Levinson (1997), le cadre de référence intrinsèque basé sur les axes corporels de l'observateur, le cadre de référence relatif basé sur les parties inhérentes de l'objet et le cadre de référence absolu basé sur des points de référence abstraits. L'utilisation de ces cadres de référence demande une forte capacité cognitive, du côté de l'énonceur aussi bien que du coté du récepteur (navigateur). Comprendre un trajet, ou encore produire une description absolue et complète de ce dernier, requiert la capacité mentale à sélectionner un point de vue et le calcul mental de la direction à partir de ce point de vue. Certaines directions sont plus faciles à décrire que d'autres. Les directions « gauche » et « droite » sont généralement beaucoup plus difficiles à saisir que « en avant » ou « en arrière » et « par-dessus » ou « par-dessous » (Franklin & Tversky, 1990). Denis *et al* (1999) ont développé des procédures spécifiques pour générer de bonnes indications d'itinéraires, basées sur la conclusion qu'une information essentielle était un ensemble de mesures itératives :

0 – placer le navigateur (la personne qui écoute les descriptions) au point de départ

1 – donner une description

2 – signaler un point de repère

3 – réorienter le navigateur

4 – donner à nouveau une description, puis répéter 2-3-4 autant de fois que nécessaire.

On voit ici émerger une structure algorithmique d'étapes, sachant qu'elles ne doivent pas nécessairement apparaitre dans des énoncés séparés. Peu de travaux ont été réalisés sur ce qui se passe quand on donne des descriptions verbales durant l'apprentissage spatial, ou durant la navigation même, en milieu réel. Les études réalisées portent d'avantage sur les processus en jeu pour produire ou interpréter une description verbale d'itinéraire (Allen, 1997; Denis *et al*, 1999; Tversky, 1996; Barbéris & Manes-Gallo, 2007). Chaque étude a été faite sur la base de descriptions statiques et en supposant que l'information véhiculée par une description verbale de l'itinéraire ne change pas avec le déplacement physique du navigateur. Cependant, c'est le contraire dans la réalité, où le message verbal initial est constamment actualisé en cours de route. Ainsi, l'information évolue pour être couplée aux changements de position du navigateur, de son orientation par rapport à l'environnement (Tom & Denis, 2003). D'autres méthodes, telle que le GPS, qui donne un message verbal actualisé et couplé à un affichage virtuel d'un espace visuel en 3D, ont été estimées suffisantes pour guider une personne aveugle ou malvoyante dans son déplacement (Loomis *et al*, 2005).

II.2. 3. Prise d'information sur la base de nouvelles technologies

De nos jours, la localisation d'un endroit est le plus souvent renseignée au moyen d'instruments tels que le GPS, les plans 2D visualisés en ligne sur le WEB au moyen de l'écran d'un ordinateur. Ces plans sont parfois accompagnés d'images satellites de l'environnement, générant une forme de réalité virtuelle qui offre une vision séquentielle des lieux que l'on souhaite connaître ou visiter par la suite. Cependant, afin d'obtenir une précision optimale, on a souvent besoin d'utiliser un plan 2D, physique ou virtuel, car il permet d'extraire une représentation globale de l'environnement, souvent d'un seul regard, surtout si le plan est bien construit et reflète correctement l'échelle relative des lieux (voir la Figure 2 ci-dessous). Néanmoins, la plupart des gens abandonne ces outils une fois qu'ils ont construit et structuré une connaissance propre ou représenté un lieu ou un parcours, laissant place ainsi à leurs propres sens pour s'orienter, c'est-à dire à la vision, l'audition, le toucher et l'ensemble intégré de

l'expérience sensorimotrice. Les représentations spatiales que l'homme acquiert ainsi de son environnement sont, toutefois fréquemment incomplètes et présentent des erreurs telles que les distorsions ou des fragmentations, souvent mentionnées dans de nombreux travaux (Baird *et al*, 1982; Casey, 1978; Gärling *et al*, 1982; Golledge, 1987; Lloyd & Heivly, 1987; Tversky, 1981). S'il est supposé que le fait de spécifier un lieu dans un environnement implique des erreurs, que se passera t-il quand l'homme aura à se représenter des lieux multiples, leurs attributs, et les connexions ou d'autres relations spatiales entre eux, une activité appelé « *multitracking* » en jargon anglo-saxon contemporain ? Que vont apporter ces différents moyens d'aide à la navigation quand il s'agit d'utiliser à bon escient, c'est-à-dire de manière sélective et pertinente, les données explorées pour réaliser un déplacement ?

Figure 2 *:* ***Les moyens de prise d'information qu'offre la technologie moderne pour localiser un endroit ou pour visualiser un itinéraire****. A) à gauche, vue écran d'un système GPS, à droite une image virtuelle de la rue d'une ville captée sur le WEB; B) à gauche, plan 2D d'un quartier avec rues et intersection que l'on peut visualiser sur écran d'ordinateur et imprimer pour usage ultérieur, à droite une image satellite captée sur le WEB du même quartier.*

Si l'on se base sur les représentations cognitives d'environnements connus, à savoir déjà explorés, la représentation externe (physique) la plus utilisée est définitivement celle du plan. En dehors d'une géométrie pure des lieux, le plan peut contenir des connaissances des individus ou des sociétés. Il fonctionne comme une archive, ou support d'activité.

Le plan 2D est la plus ancienne représentation de l'information et utilisé depuis 5000 ans (Hurtle & Sorrows, 2006). Il permet d'acquérir des connaissances spatiales, définir des chemins, trouver des raccourcis et routes alternatives et de se faire une idée (hypothèse) de stratégie pertinente pour parcourir les lieux montrés. Quand on avance en mode *wayfinding*, le plan 2D apparait comme un outil fondamental, donnant une vision globale schématisée de la partie d'un environnement et de lieux d'intérêt résumant une réalité physique objective aussi bien que des mondes subjectifs en indiquant, par exemple en rouge, les parcours estimés particulièrement inclinés, difficiles, ou accidentés. Aussi, aide l'homme à enregistrer la localisation relative et absolue des endroits, leurs caractéristiques, et des relations spatiales entre repères et routes. Conventionnellement, les plans utilisés depuis toujours dans le *wayfinding s*ont des représentations, organisés en deux dimensions, d'un segment de la surface terrestre. Ils contiennent des symboles liés à des caractéristiques réelles et une légende, tel que le nord en haut de la carte, par exemple, mais aussi des cadres de références, telle qu'une grille régulière liée aux directions cardinales, permettant de coordonner le système pour donner des précisions de localisation, ou une échelle qui donne des distances caractéristiques des relations spatiales dans le monde réel. A partir de toutes ces propriétés, une représentation objective d'une surface peut être développée. Sa validité et fiabilité peut donc être déterminé de manière objective. Traditionnellement, la façon la plus simple et universelle de représenter un espace est bien celle du plan.

Les informations visuelles jouent un rôle dominant dans le processus de navigation. Cependant, il n'est pas toujours facile d'utiliser des cartes 2D pour guider des actions dans un environnement physique en 3D, car il faut traduire les références spatiales montrées dans la carte, représentées sous forme de vue globale (« *bird eye view* »), en représentations du monde réel, qui est accessible dans le domaine de la réalité virtuelle à travers une perception visuelle dite « immersive ». Etablir des correspondances entre les structures de l'environnement réel et leurs représentations 2D sur cartes n'est pas une tâche facile, même lorsque la carte 2D est couplée à une image satellite des lieux. Ces

représentations hybrides constituent une façon parmi d'autres de connecter le monde des cartes au monde réel par le biais de la réalité augmentée. Les systèmes GPS offrent une option de plus, qui est le rajout d'instructions verbales. Les utilisateurs de GPS s'appuient largement sur les indications verbales et ne lisent pas souvent les cartes. De plus, les repères sont rarement exploités dans ce genre de système. Même s'ils semblent suffisants pour nous guider dans un environnement inconnu, il s'avère que parfois les routes indiquées ne sont pas toujours valides à cause de la construction de nouvelles routes ou à cause de changements dans le sens des rues et chemins ou dans l'aménagement de feu rouges et d'intersections. Lorsqu'un navigateur est amené à re-planifier le chemin construit à partir de conditions initiales qui ne sont, pour une raison ou une autre, plus valides, le problème de la représentation mentale des lieux surgit pleinement. Les études sur la navigation dans des environnements virtuels a donné lieu à des résultats similaires à ceux des travaux sur la navigation en milieu réel (Ruddle *et al*, 1997; Witmer *et al*, 1996). La théorie suggère que la navigation au moyen d'informations visuelles est un processus à niveaux d'intégration multiples, qu'une personne se trouve en immersion virtuelle ou dans un environnement réel (Darken & Sibert, 1996).

Les travaux de Thorndyke & Hayes-Roth (1979) différencient la nature de l'encodage en propositions verbales de l'encodage imagé pur dans la mesure où ce dernier conserve les propriétés spatiales difficilement explicables par encodage verbal. Les travaux d'Anderson (1983) ont montré qu'un codage graphique conserve les propriétés spatiales par rapport à un codage verbal et que, de ce fait, le *wayfinding* était facilité par des représentations imagées. L'interprétation d'un plan visuel implique l'application des conventions cartographiques et l'établissement de correspondances entre une vue de l'environnement, sélectionnée par l'utilisateur du plan, et l'endroit d'intérêt. Ainsi, quand on est dans un environnement totalement inconnu, par exemple, l'apprentissage des lieux se fait le plus souvent au moyen des représentations visuelles physiques de la localisation de cet endroit d'intérêt. En revanche, les personnes atteintes de déficits visuels doivent s'appuyer sur d'autres moyens pour apprendre leur chemin ou se déplacer dans un nouvel environnement. La transmission de l'information relative à l'espace comprend la lecture, la reconnaissance de caractères, et l'affichage graphique de scènes 2D et 3D. Le code Braille, introduit au 19ème siècle par Louis Braille, est devenu l'outil standard de lecture pour les personnes aveugles.

Ce type de transmission graphique s'est appuyé essentiellement sur des interfaces tactiles qui représentent l'information (caractère, mot, image) en relief. Confronter un déficient visuel au défi de la mobilité nécessite impérativement qu'il dispose d'informations spatiales, locales et globales, d'au moins de son environnement le plus proche. Ceci implique aussi que des informations relatives à l'orientation et à la localisation des obstacles soient accessibles et avant tout, une forme non-visuelle de perception de l'espace, au moyen d'outils de compensation qui véhiculent l'information spatiale au moyen du toucher, de l'audition et de l'odorat, qui peuvent être activés de manière complémentaire. En effet, la perception quasi globale de l'espace est le facteur inhérent de l'autonomie et de la sécurité de tout déplacement humain. Parmi les systèmes actuellement disponibles, on retrouve les lunettes « intelligentes » permettant la détection d'obstacles, tant statiques que dynamiques. Il s'y associe un système de vision stéréo épi-polaire pour l'analyse de la scène, la détection et la localisation d'obstacles et une surface à stimulation tactile permettant l'affichage des obstacles en temps réel (Velàzquez *et al*, 2004). D'autres moyens, comme les systèmes mobiles, le GPS par exemple, sont devenus un moyen très utilisé dans nos sociétés. Ces derniers peuvent aider à résoudre des tâches cognitives liées à l'environnement réel. Les personnes aveugles peuvent, par exemple, utiliser un système de navigation mobile équipé d'instructions auditives, conçu pour les guider dans le *wayfinding* (Slavik & Berka, 1999).

II.3. Stratégies de navigation

Quelles sont les informations pertinentes qui doivent être sélectionnées et exploitées pour aider une personne à se déplacer ou à retrouver un parcours ou chemin ? Selon Passini (1994), lors de l'exploration d'un nouvel environnement une personne commence par localiser d'abord les lieux et les objets importants pour construire une des connaissances relatives aux points de repères les plus saillants. Puis, elle structure ces connaissances pour établir des connections entre les différents repères se trouvant l'un après l'autre sur son itinéraire imaginé, permettant ainsi d'aboutir à une représentation des bouts de parcours, qui se suivent dans un certain ordre et permettent l'intégration mentale de chemins et de tournants successifs. Enfin, pour avoir une vue d'ensemble de l'environnement incluant les chemins et les repères ancrés dans ces

derniers, une représentation d'ensemble de la configuration des routes, des intersections et des repères est générée.

II.3. 1. Planification progressive basée sur des points de repères

Un repère peut être défini de nombreuses façons, comme un foyer stratégique, rapproché ou éloigné du chemin parcouru, un foyer intermédiaire sur les routes qui aide à prendre des décisions relatives à quand il faut tourner et dans quel sens, ou comme un objet significatif, qu'il soit physique et construit ou interne et symbolique, ou culturellement déterminé comme objet de démarquage des lieux et environs, par exemple. Un repère peut être entouré par des nœuds de significations variables, endroits moins signifiants tels que les intersections de rues non-critiques, ou encore des endroits sans intérêt immédiat comme une école, par exemple, quand on cherche une boucherie qui se trouve dans une rue différente de celle de l'école. Ainsi, les repères agissent comme des amorces significatives pour d'autres fonctions ou actions et les nœuds comme des amorces pour les repères, de sorte qu'une fois un nœud spécifique a été perçu, la chance qu'un point de repère se trouve proche est accrue (Shute 1984 cité par Golledge, 1999). Les repères sont souvent enregistrés en mémoire et rappelés ultérieurement à cause de la dominance de leur forme visible, la particularité de leur forme ou structure, ou leur signification socioculturelle (Appleyard, 1969, 1970). Mais l'utilisation traditionnelle des repères à deux composantes distinctes. Dans un sens, un repère doit être capable d'attirer notre attention et d'être reconnu par plusieurs personnes (cf la Tour Eiffel ou la Statue de la Liberté, voir la Figure 3 ci-dessous). Cependant, certains endroits augmentent la signification des repères qui s'y trouvent de façon tout à fait particulière, comme notre foyer, la maison de nos parents ou encore notre lieu de travail.

<u>Figure 3</u> : Exemples de repères distinctifs et universellement connus de grandes villes du monde

Selon les conclusions de Couclelis *et al* (1987) ou encore de Siegel & White (1975) les repères semblent être sélectionnés sur la base de leur visibilité, pertinence, caractère distinctif, ou sur la base de leur permanence, comme le montre bien l'exemple de la Tour Eiffel et de la Statue de la Liberté, universellement connus. Un repère aide aussi dans la mesure où il peut signaler l'endroit où l'action ou le déplacement doit changer (le point où il faut tourner, par exemple), la localisation proche d'autres repères, où que le chemin que l'on vient de prendre est bon (fonction de confirmation par repère). Il est tout à fait indispensable d'avoir une bonne connaissance de la géométrie des routes pour pouvoir se rendre d'un point de repère à un autre sans difficultés. La fréquence avec laquelle sont mentionnés les repères comme aide à la navigation donne lieu à des différences interindividuelles. Par exemple, il a été montré que les stratégies des femmes reposent largement sur des repères visuels et plus souvent que chez les hommes (Tom & Denis, 2003).

II.3. 2. Planification globale basée sur la géométrie des routes et les directions principales

La planification globale basée sur la géométrie des routes est une forme plus intégrée d'exploitation de connaissances spatiales comparée à celle basée sur les points de repères. Elle décrit les séquences des actions de navigation (Gollegde, 1999) et elle est définie comme une connaissance procédurale requise pour réussir à naviguer d'un point de départ vers une destination donnée. L'apprentissage de l'environnement sur la base des routes et des étapes est souvent considérée la voie la plus importante utilisée par

l'homme (MacEachren, 1992a). Dans ce processus, que nous mettons en pratique tous les jours, l'homme apprend les routes mais il devient aussi attentif aux détails, enregistre les connections entre routes au moyen de repères se trouvant soit à proximité, soit plus loin dans l'environnement. Pour apprendre une route, cette stratégie nécessite une connaissance du point de départ et de ce que doit être le point d'arrivée, ainsi que l'identification de segments de parcours et des perspectives (angles).

II.3.3. Stratégies mixtes basées sur la configuration des routes et points de repères

Une stratégie mixte consiste à exploiter la position des objets dans l'espace ou sur un parcours et la distance entre objets au moyen d'une connaissance de la configuration des routes. Il s'agit là d'une représentation « à vol d'oiseau » de l'environnement. Pour les aborigènes australiens vivant dans le désert, les unités métriques sont sans utilité pour représenter des distances et c'est seulement le temps, estimé ou réel, du parcours qui est utilisé. Vivant dans un paysage qui est très pauvre en indices visuels, ils ont ainsi construit un système global de correspondances qui intègre les trajets dans leur univers mythologique, sous forme d'une mémoire collective des lieux, transmise essentiellement par le chant ancestral (appelé *« songlines »* en anglais). Les trajets sont ainsi des « itinéraires mythiques » incarnés dans le paysage. Le chant ancestral transmet l'expérience détaillée de voyages et de trajets à travers ces paysages, qui ne sont pas matérialisés et qu' il faut, de ce fait, apprendre ou « en faire l'expérience », dans le chant ou dans le réel. Les itinéraires forment ainsi un réseau complexe de « routes invisibles », dans le désert et le territoire est envisagé comme un graphe, avec des relations topologiques. L'orientation dans le désert n'est pas egocentrique mais allocentrique et relative à ce graphe plutôt qu'à la géographie. La mise en œuvre d'une stratégie allocentrique dans la navigation vers l'inconnu se fait soit par l'exploration répétée de l'environnement en utilisant plusieurs itinéraires (Waller *et al*, 1998a), ou encore par utilisation de cartes qui offrent une vue globale de l'espace.

II.4. Facteurs en jeu dans le wayfinding

Il existe plusieurs facteurs qui influencent nos capacités à nous déplacer dans des environnements complexes et inconnus. On retrouve dans ce contexte, des facteurs qui sont liés au sujet lui-même et d'autres, liés à l'environnement dans lequel il se trouve.

II.4. 1. Facteurs intrinsèques

Les facteurs intrinsèques qui ont une influence sur les représentations de l'espace et les performances de navigation sont le sexe, l'âge et l'expérience ou la compétence du navigateur.

Sexe

Actuellement, une grande controverse entoure la question relative à l'existence, ou l'importance, de différences individuelles liées au sexe dans la cognition spatiale du monde réel (Self & Golledge, 2000). Des études ont montré qu'il n'existait pas de différence significative entre la femme et l'homme quand il s'agit de localiser précisément des repères (Montello & Pick, 1993; Sadalla & Montello, 1989), ou de manière générale dans le *wayfinding* chez les personnes aveugles (Passini *et al*, 1990). Les hommes semblent plus précis que les femmes dans la localisation géométrique de bâtiments sur une carte (McGuiness & Sparks, 1983), ou encore dans la localisation de la direction des repères (Bryant, 1982), dans l'estimation de la distance parcourue (Holding & Holding, 1989) ou dans l'utilisation des points de références cardinaux pour analyser les directions (Ward *et al*, 1986). Aussi, il a été trouvé que les hommes font moins d'erreurs dans des simulations du *wayfinding* sur ordinateur (Devlin & Bernstein, 1995) comparés aux femmes. Les femmes, par contre, sont beaucoup plus précises dans le rappel des repères (Galea & Kimura, 1993) et dans l'association d'objets à localisation particulière (McBurney *et al*, 1997). Les hommes ont tendance à garder une piste de leur position relative aux références distales, ce qui implique une connaissance des configurations, tandis que les femmes expriment une préférence pour les instructions étape par étape, expliquant le chemin qu'elles sont en train d'emprunter. Les femmes ont été caractérisées, dans le *wayfinding*, par une approche au moyen de repères, tandis que les hommes préfèrent une approche sur la base d'orientations et de directions cardinales (Lawton, 1994). Cependant, Cornell *et al* (2003) n'ont pas trouvé de différences de stratégies ou de performance entre les hommes et les femmes dans les tâches de *wayfinding*. Les femmes avaient tendance à sous-estimer leur sens d'orientation, un résultat qui corrobore les travaux de Montello *et al* (1999) et certaines

mesures d'anxiété ou d'incertitude spatiale chez les femmes et chez les hommes (Lawton, 1994).

Age

Nos compétences de navigation et d'orientation dans l'espace sont certainement d'une quelque peu fonction de notre âge et plus ce dernier augmente plus nos habilités cognitives ou spatiales auront tendance à diminuer. Peu de travaux ont été réalisés sur les stratégies et les performances de *wayfinding* chez les personnes âgées. Il semble, selon les conclusions de Siegel & White (1975), que la représentation de l'espace est le résultat d'apprentissages complexes et que l'exercice régulier des circuits neuronaux qui sous-tendent cette faculté (voir aussi Janzen *et al*, 2007) a de fortes chances d'interagir avec le facteur « âge ». Ainsi, on peut s'attendre à trouver des sujets relativement jeunes qui sortent peu de chez eux et auront de ce fait des performances de navigation relativement pauvres et, d'autre part, des gens bien plus âgés qui voyagent et font des randonnées régulièrement et auront des performances bien supérieures dans une tâche de *wayfinding* administrée.

Expérience individuelle

Hebb (1949) était un des premiers psychologues à avoir formulé une théorie systématique pour expliquer comment sont construites les connections neuronales dans le système nerveux à travers de stimulations répétées. Ainsi, comme déjà évoqué, le fait de se déplacer souvent dans des environnements connus ou peu connus aide une personne à construire des cartes cognitives et des synapses spécifiques au niveau cortical. Dans la littérature consacrée en neurosciences contemporaine (cf Save, Nerad & Poucet, 2000) on parle ainsi de neurones et circuits corticaux dédiés au décodage des espaces et des lieux *(« place cells »*). Au niveau comportemental, mis à part les expériences célèbres sur les souris et les hommes de Tolman (1948) ou encore les études d'apprentissage spatial chez le rat au moyen de la piscine de Morris (Morris, 1981; Morris *et al*, 1982; Schenk & Morris, 1985; Sutherland & Rodriguez, 1989; Sutherland & Rudy, 1988), différentes méthodes d'apprentissage ou de familiarisation ont été employées (exploration directe, cartes 2D, dessins, descriptions écrites ou orales, images cartographiques, réalité virtuelle) pour préparer des hommes et des femmes à la

navigation en environnements à moyenne ou grande échelle, en milieu réel ou virtuel. Apprendre un environnement est un processus dynamique dans lequel les informations sont en constante actualisation et il est supposé que les conceptions subjectives de l'environnement sont un peu différentes de la réalité objective. L'apprentissage et l'expérience aident à structurer la cognition dans l'apprentissage de l'environnement et certaines géométries standards ont pu être identifiées au cours de la formation de représentations (Golledge, 1999). Nous y reviendrons ultérieurement dans le chapitre relatif aux expériences de cette thèse.

Handicap sensoriel

« *La réalité spatiale à laquelle accède un organisme dépend fondamentalement de l'équipement sensoriel dont il est doté* » (Paillard, 1973). Les personnes non-voyantes disposent de représentations imagées non visuelles. Ainsi la représentation d'une horloge constitue une image dite haptique, élaborée par le souvenir de l'exploration manuelle récurrente du cadran horaire. De la même manière, une image auditive peut être produite par le son d'un 'coucou' par exemple. La vision est, cependant, plus adaptée à la perception de l'espace que le sens haptique (Hatwell, 1986) dans le sens où ce dernier se limite à l'espace péricorporel, or, la vision s'étend à un espace distal (Honoré *et al*, 2002). Ainsi, la reconnaissance des lieux sur une carte géographique est quasiment instantanée au moyen de la modalité visuelle, alors que l'exploration manuelle d'une carte en relief, par exemple, passe par un temps de traitement, dans la formation de représentations interne des lieux, qui est significativement plus long (Hatwell, 2000).

II.4. 2. Facteurs extrinsèques

L'environnement dans lequel nous vivons est riche en informations visuelles et sonores. Beaucoup de points de repères, tels que les magasins, les indications au moyen de panneaux de publicité ou de direction, des couleurs, odeurs et bruits sonores souvent nuisent à notre perception où à l'analyse pertinente et rapide des relations spatiales qui nous intéressent. Ces facteurs extrinsèques constituent une source de perturbation et conduisent à ce que l'on appelle « distraction » en psychologie cognitive, un mot à connotation plutôt négative car on entend ici par distraction non pas le fruit d'une

activité de détente mais celui d'une déviation du traitement de l'information sensorielle et/ou cognitive.

Ainsi, les notions de « bruit » ou de « stress », induits par une source sonore ou visuelle non-pertinente et de ce fait indésirable, permettent d'appréhender certaines formes de détérioration dans les performances de personnes dans des tâches cognitives diverses (Herbelin et *al*, 2005; Evans et *al*, 1984), surtout lorsqu'elles sont complexes et sollicitent les limites mêmes de la mémoire de travail de l'homme.

III. TRAITEMENT COGNITIF DES INFORMATIONS SPATIALES ----------

Durant les dernières décennies, le traitement cognitif des informations spatiales à fait l'objet de nombreuses recherches scientifiques, tant chez l'homme que chez d'autres espèces. Les chercheurs se sont intéressés à la question relative aux différentes informations utilisées par le sujet dans la formation des cartes cognitives de l'environnement, ainsi qu'aux propriétés fonctionnelles de ces cartes, qui font partie de la mémoire à long terme et de la mémoire de travail. D'autres questions portant sur les structures neuronales impliquées dans la cartographie cognitive, et comment elles coopèrent entres elles, ont été étudiées. Ces travaux, évoqués ici dans certains paragraphes, ne seront pas discuté de manière détaillée dans cette thèse. Des méthodes spécifiques ont été développées pour étudier le traitement cognitif de l'information spatiale chez l'homme, notamment les méthodes d'exploration directe des lieux, l'encodage des relations spatiales au moyen d'indications verbales, ou au moyen de nouvelles technologies telles que la réalité virtuelle. Dans ce chapitre, on discutera différents types de traitements de l'information spatiale, donnant lieu à la formation de représentations cognitives de l'espace au moyen de la mémoire et plus particulièrement au moyen d'interactions entre processus mnésiques dits « à long terme » et « à court terme », qui constituent l'un des points principaux des expériences que nous avons réalisées.

L'homme se réfère à des représentations cognitives de l'espace lorsqu'il se déplace dans un environnement donné. Ceci passe par l'utilisation des « *produits relatifs à l'espace même* » (cf Liben, 1981), tels que les plans, photographies, descriptions verbales ou écrites et, plus récemment, les environnements virtuels. Les représentations cognitives formées sur la base de tels supports sont supposées structurées sous la forme de cartes cognitives (Figure 4). Dans la littérature consacrée, il est postulé que la nature d'une carte cognitive dépendra de celle des informations encodées durant l'acquisition des connaissances spatiales (Thorndyke & Hayes-Roth, 1982). Cependant, malgré certaines différences fondamentales entre moyens d'acquisition, il est tout à fait possible que les représentations mentales qui en résultent soient similaires, ce qui s'expliquerait par la capacité du cerveau humain à intégrer des informations provenant de sources multiples et différentes en des représentations cognitives fiables et stables (Kitchin & Freundschuh, 2000).

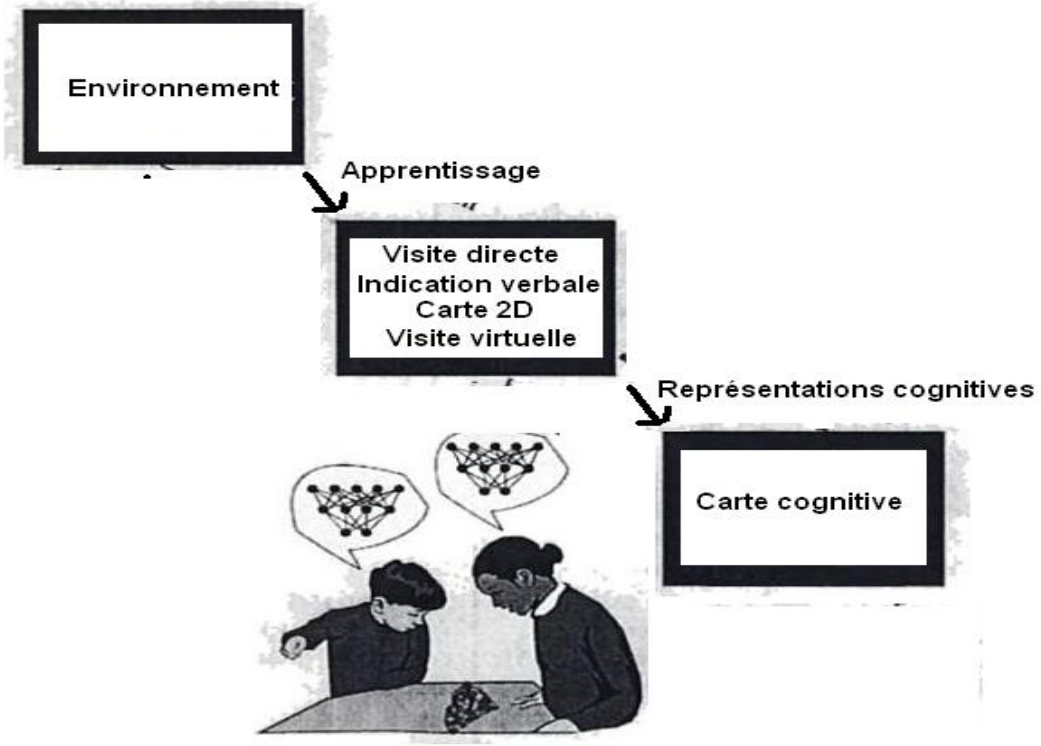


Figure 4 ***: Représentation schématique et, par soucis de simplicité, réductionniste de la manière dont l'homme acquiert des cartes cognitives de son environnement physique****. Les informations extraites au moyen de différentes sources sont encodées sous forme de liens ou nœuds topologiques, puis structurées de manière hiérarchique dans les circuits mnésiques du cerveau.*

III.1. Représentation cognitive d'environnements complexes réels

En neurosciences, la notion de représentation est définie en termes d'une « *activité neuronale distribuée qui véhicule un ensemble intégré d'informations à travers de groupes de neurones* » (cf Churchland, 2002, page 64). Cette définition étant trop abstraite pour bien servir notre propos ici, nous nous référons aux études du développement cognitif de l'enfant de Piaget (1950), qui utilise le terme de représentation pour référer soit à des connaissances soit, de manière plus générale, à des pensées.

C'est ce dernier sens qui est évoqué quand un individu décrit l'image qu'il se fait d'un environnement (Lynch, 1960; Strauss, 1961). Les représentations cognitives de l'espace sont donc des entités mentales complexes, intériorisées et construites par l'individu interaction avec l'environnement. La géométrie de l'espace est sans nul doute une des bases de ces représentations. Cette géométrie peut être décrite en termes de

points, de relations entre points, de lignes, de directions, de champs et de surfaces. Dans l'apprentissage et l'expérience directe de lieux, certaines géométries standards de l'espace physique sont intégrées au moment de la formation des représentations (Golledge, 1999). Cependant, les représentations ne sont pas le reflet direct de leurs homologues du monde physique et une distance physique, entre la maison et la pharmacie par exemple, peut être représentée comme un itinéraire long ou court, selon les individus. Aussi, la symétrie des distances euclidiennes entre objets physiques n'est pas retenue universellement dans la représentation cognitive humaine des routes et des trajets. Les directions ne sont pas intégrées de manière fidèle dans notre espace mental car ce dernier est dominé par des cadres de références personnalisées, ou égocentriques (Moore & Golledge, 1976a).

Dans un environnement à moyenne ou grande échelle, la structure des lieux et ses caractéristiques sont encodées par l'intégration séquentielle d'observations locales au lieu d'être perçues d'un seul regard ou point de vue (Kuipers, 1982, 2003). La formation de représentations et l'encodage mnésique de tels environnements tendent à réduire les informations spatiales inutiles, ce qui peut engendrer une représentation fausse de certaines caractéristiques de l'environnement physique (Golledge, 1999; Tversky, 1981). Dans la littérature consacrée, on évoque parfois un « phénomène d'augmentation », où les individus ont tendance à rajouter des fonctionnalités inexistantes de lieux à leurs représentations mentales de ces derniers (Downs & Stea, 1973, page 21).

Des erreurs d'encodage, de décodage, ou de représentation d'informations peuvent produire des distorsions cognitives qui auront des effets négatifs sur la navigation ou une performance spatiale ultérieure, sachant que l'exécution d'une tâche spatiale peut nécessiter aussi bien un rappel qu'une externalisation des informations stockées en mémoire, au moyen d'un dessin, d'une description écrite ou un récit oral de lieux ou d'itinéraires, par exemple. Ces produits sont fréquemment incomplets ou fragmentés et reflètent des erreurs « diagnostiques » qui nous renseignent sur les failles dans nos représentations de l'espace (Baird *et al*, 1992; Bryant, 1982; Lieblich & Arbib, 1982 ; Taylor & Tversky, 1992a).

La qualité d'une représentation mentale de connaissances spatiales dépend de la méthode qui a été utilisée pour acquérir ces connaissances. Plusieurs courants théoriques présentés dans la littérature consacrée s'opposent ou se complètent. Il y a

accord sur le fait que les connaissances spatiales acquises sur la base d'une exploration directe sont de nature différente de celle acquises au moyen d'une carte, par exemple.

Etant donné que les cartes présentent une orientation spécifique, l'acquisition de connaissances relatives aux lieux et itinéraires nécessite la rotation mentale de l'espace selon la position cardinale et de l'endroit dans lequel se trouve l'individu, permettant d'aligner la représentation mentale des lieux à leur représentation physique (McNamara et *al*, 1984; Presson, DeLange & Hazelrigg, 1989; Presson & Hazelrigg, 1984). Une carte mentale non alignée à la carte physique conduit à des erreurs de navigations plus nombreuses (Boer, 1991; Rieser, 1989). La carte 2D nous offre la possibilité de nous représenter d'une seule vue la configuration spatiale globale des lieux au moyen d'une seule image. Cependant, une représentation mentale basée sur la configuration globale d'une carte 2D est de nature différente de celle acquise au moyen d'une expérience directe et progressive de la géométrie des routes et des intersections et des repères qui se trouvent sur ces routes.

Différentes approches théoriques sur la formation des représentations mentales de l'espace chez l'homme existent. La théorie de Pylyshin (1981), par exemple, postule que les représentations mentales de l'homme sont par nature de type propositionnel, c'est-à-dire linéaire. Elles s'élaborent au moyen d'une mémorisation d'éléments connus de l'espace, enregistrés les uns après les autres, comme des phrases. Kosslyn (1980) suggère que la mémorisation de l'espace est bidimensionnelle et analogue à ce dernier et, de ce fait, proche d'une image ou d'une carte 2D. Selon Paivio (1986), les deux hypothèses seraient complémentaires et suggèrent des modes de fonctionnement cognitifs dont la mise en œuvre dépendrait du type de problème posé à l'individu.

La théorie prédominante sur la formation de représentations cognitives des espaces complexes chez l'homme est celle de Siegel & White (1975) ou encore Thorndyke & Goldin (1983), qui postulent que la formation de représentations de l'espace se réalise au moyen de l'association mentale progressive entre repères, routes, et configurations globales ou trajets. Ce courant est appelé dans la littérature anglo-saxonne « *LRS theory* » (*Landmark-Route-Survey theory*). Ainsi, lors d'une expérience directe avec un environnement, l'encodage des repères qui sont statiques se ferait le premier, dépendrait de l'orientation des routes. Ensuite, les informations spatiales relatives à la géométrie des routes sont encodées et les repères sont associés à chacune des routes. A ce stade, la représentation mentale du parcours n'est pas encore optimale. L'individu sait comment se rendre de A vers B et de B vers C, par exemple, mais il ne connaît pas encore le

raccourci de A vers C, par exemple. A ce stade de représentation mentale, les connaissances spatiales correspondraient à un graphe avec des nœuds. Plus le nombre de nœuds représentés augmente, plus le graphe s'agrandit. L'intégration en une représentation globale des lieux ou configuration d'ensemble d'un trajet ou itinéraire ne peut se faire qu'une fois le graphe mental des routes et des intersections critiques est complet. A ce stade, l'individu est capable d'imaginer un parcours nouveau sous forme de « vol d'oiseau », d'estimer correctement les distances relatives entre repères et routes, et de se représenter les directions. La théorie LRS prend en compte les caractéristiques des environnements urbains à moyenne et grande échelle, décrites préalablement par Lynch (1960), et s'applique donc à la navigation en milieu urbain sur la base d'expériences directes avec les lieux.

III.2. Représentation cognitive d'environnements complexes visualisés sur écran

Les études sur les représentations cognitives de l'espace chez l'homme sont généralement basées sur des mesures statiques du comportement spatial, dans le réel ou l'artificiel, ainsi que sur l'analyse des dessins, des interviews, des rapports verbales, l'estimation de distances et de directions (Golledge, 1987). Dans des situations « naturelles », le comportement spatial ainsi que la cognition peuvent être influencés en faisant varier les conditions d'exploration préalable, les moyens de navigation, ou le temps d'exposition préalable. Cependant, la difficulté de contrôler tous les paramètres potentiellement importants représente un problème majeur. Lorsqu'il s'agit d'environnements réels complexes, on maîtrise mal certains facteurs liés à la précognition spatiale des participants, aux caractéristiques spécifiques de l'environnement test et à la répétition systématique des expériences. Pour ses raisons, certaines recherches sur la navigation et le *wayfinding* ont été réalisées avec des représentations virtuelles d'environnements réels ou imaginés. Les environnements rendus virtuels permettent une navigation interactive purement visuelle (Ellis, 1991; Durlach & Mavor, 1995). Deux types de systèmes virtuels ont été exploités dans ce type de recherche. Le système « ordinateur », qui permet de générer un environnement virtuel projeté sur un écran fixe, et le système « immersif », où les environnements sont affichés simultanément sur deux petits écrans devant les deux yeux de l'individu au

moyen d'un dispositif de type casque, attaché à sa tête (« *head-mounted display* ») (voir Figure 5).

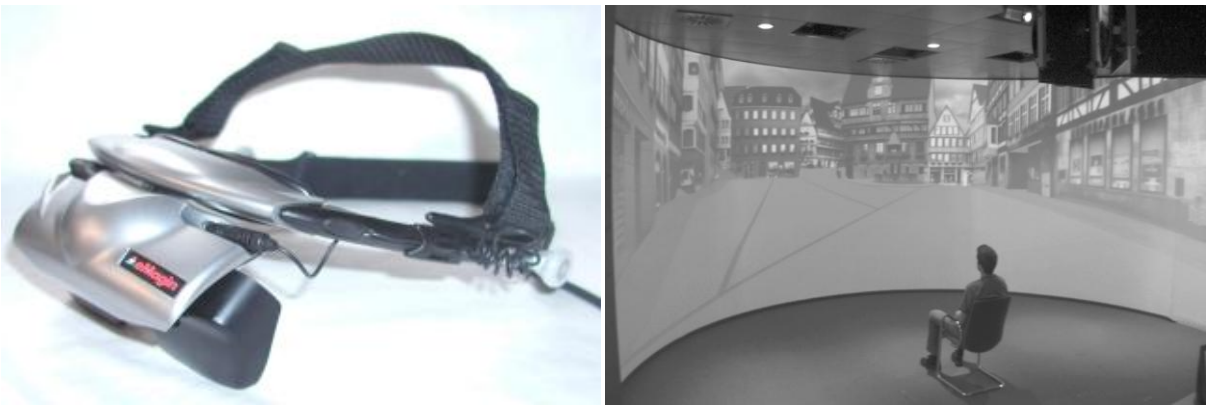


***Figure 5* : Deux systèmes de génération d'environnements complexes** *: à gauche, un dispositif d'affichage, porté sur la tête, avec un petit écran optique en face de chaque œil (affichage binoculaire). A droite, affichage sur écran d'ordinateur (d'après Meilinger, 2008).*

Un des points forts de cette technologie est le fait de pouvoir créer des environnements de complexité variable, d'offrir des mesures continues tout au long de la navigation ainsi que les moyens de contrôler tous les paramètres d'apprentissage, le temps ainsi que le nombre, la nature et la position des repères. Malgré ces points positifs, il existe néanmoins des inconvénients à ces techniques, tels qu'un mauvais rendu des images avec une résolution spatiale pauvre, des distorsions optiques, ainsi que l'impossibilité de percevoir ou d'inférer correctement les distances (Witmer & Kline, 1998).

La navigation dans un environnement réel est le résultat d'une représentation dite « à orientation libre » ou « à orientation préférée », ou encore « dépendante de l'orientation » s'il s'agit d'un apprentissage des lieux au moyen d'une carte 2D, comme évoqué plus haut. Dans la navigation en environnement virtuel, les chercheurs ont trouvé des résultats soit très similaires (Tlauka & Wilson, 1996), soit assez différents voire contradictoires (Péruch & Lapin, 1993; Richardson *et al*, 1999) par rapport à ceux trouvés en environnements réels. Tlauka & Wilson (1994) ont montré que les repères avaient un impact décisif dans l'acquisition des connaissances sur les routes dans l'environnement virtuel. Les performances étaient meilleures pour le groupe d'individus avec repères que pour celui qui n'en avait aucun. Les individus ayant effectués une

tâche de *wayfinding* dans un environnement virtuel ont réussi aussi bien que dans l'environnement réel, ce qui avait permis de conclure à un transfert efficace d'informations spatiales d'un milieu à l'autre (Witmer *et al*, 1996). Les travaux de Regan & Pose (1993) ont montré que l'environnement virtuel contenait d'avantage d'informations essentielles, c'est-à-dire effectivement utilisées et exploitées, comparé à l'environnement réel, où l'on maîtrise moins bien les facteurs de distraction.

III.3. Représentation de l'espace et déficit visuel

Les représentations mentales de l'espace se mettent en place au moyen d'interactions entre nos systèmes sensoriels. Les stimuli visuels sont traités plus rapidement que les stimuli auditifs ou tactiles, et ils sont souvent plus riches en information. Ceci fait de la vision le moyen le plus efficace pour représenter l'espace. Cependant, les autres sens, tel que le toucher ou l'audition, qui vient remplacer la vision dans l'appréciation des distances et de l'orientation, interviennent et sont importants. Les sens kinesthésiques également. Cette multi-modalité fait qu'une personne aveugle ou malvoyante est parfaitement capable de se représenter l'espace, en s'appuyant sur des systèmes alternatifs d'encodage et de traitement de l'information.

Chez les personnes aveugles ou malvoyantes, les représentations mentales de l'espace se forment et sont influencées par la coordination tactile et motrice. Pour naviguer dans un environnement à petite échelle, une personne aveugle ou malvoyante peut localiser les objets spontanément au moyen du toucher et par référence à son propre corps (Millar, 1994). Golledge *et al* (1996) avaient trouvé que les personnes aveugles de naissance avaient tendance à se représenter comme linéaire un parcours qui, dans la réalité, était courbée. Dodds *et al* (1982) ont réalisé une étude de navigation spatiale chez des enfants âgés en moyenne de 11 ans, atteints d'une déficience visuelle congénitale ou acquise plus tard. Les enfants devaient se déplacer dans un environnement urbain à petite échelle mais à taille variable après un apprentissage, qui a été répété quatre fois. Les résultats ont montré que les enfants aveugles congénitaux ont fait beaucoup plus d'erreurs que les autres dans l'estimation des directions. Les erreurs augmentaient aussi avec la distance entre le point de départ le point cible. Ceci suggère que les enfants aveugles congénitaux n'étaient pas capables d'intégrer les informations relatives à l'environnement en une représentation valide malgré quatre essais successifs de familiarisation. Passini & Proulx (1988) avaient demandés à des personnes aveugles

congénitales et à des personnes voyantes adultes de naviguer sur deux étages d'un grand immeuble de bureaux inconnu. Après deux visites guidées, les participants devaient retrouver leur chemin du point de départ à la localisation cible seuls, en pensant aux décisions prises pour s'orienter lors des visites guidées. Ensuite, on leur avait demandé de reproduire un modèle de leur parcours. Les participants aveugles ont eu besoins de plus de décisions partielles, en s'appuyant sur un nombre plus important de repères que les personnes voyantes. Les individus des deux groupes étaient capables de retrouver leur chemin et de reproduire leur parcours sous forme de dessin. Espinosa *et al* (1998) avaient demandés à des aveugles congénitaux d'apprendre un parcours dans un environnement non-connu soit après avoir exploré une carte tactile soit au moyen d'une exploration directe, soit au moyen d'une combinaison des deux. Après la phase d'exploration, les individus devaient naviguer seuls et estimer des distances et directions. Les performances étaient meilleures chez les participants qui apprenaient le parcours par combinaison des deux méthodes, plan tactile et visite directe. Les personnes qui ont eu l'expérience directe seule avaient le moins bien réussi, le parcours aussi bien que les estimations de distances et de directions. Des résultats similaires ont été trouvés ultérieurement sur d'autres populations d'aveugles congénitaux ou précoces (Bentzen, 1972; Brambring & Weber, 1981), montrant qu'un plan tactile permettait d'encoder des relations spatiales d'un environnement complexe de manière efficace et fiable.

A la lumière de ces résultats, on peut conclure qu'une expérience directe avec les lieux à elle seule est souvent insuffisante pour permettre la représentation cognitive fiable d'un environnement complexe chez l'adulte aveugle congénital. Elle semble totalement insuffisante chez les enfants aveugles congénitaux. Ceci suggère qu'au cours du développement, les aveugles congénitaux apprennent progressivement à utiliser une vaste gamme de repères (tactiles, auditifs, olfactifs, proprioceptifs), que les personnes voyantes n'enregistrent peut-être même pas ou pas de la même manière, pour se former une représentation des espaces physiques qui les entourent. Casey (1978) avait demandé à des enfants aveugles et voyants de produire un plan de leur campus scolaire en utilisant un modèle de construction. Il a trouvé que les enfants aveugles donnaient moins de détails que les enfants voyants, mais quelques uns d'entres eux étaient cependant plus précis dans leur reproduction. Il a conclu que la performance des enfants aveugles était corrélée au niveau de leur indépendance du point de vue de la mobilité.

III.4. Processus de traitement de l'information spatiale

L'exploitation d'informations topologiques provenant de dessins ou de cartes topographiques constitue un universel culturel. Les informations topologiques encodent à la fois ce qui est connu et agissent comme aide à la construction de connaissances nouvelles. Selon Johns (2002), une carte mentale de l'espace n'est rien d'autre qu'un réseau de représentations topologiques de lieux et de relations qui existent entre eux. L'animal aussi possède des représentations mentales de la topologie des lieux physiques qui l'entourent, comme l'avaient démontré les travaux de Tolman (1948) qui a été le premier à avoir proposé la notion de « carte cognitive ». Buttenfield (1986) a plus tard attaqué ce concept en argumentant qu'une « carte » n'était que le produit de notre façon de penser l'espace, et pouvait de ce fait fournir une mesure topologique externe tout à fait valide pour aider la compréhension de l'environnement, mais ne pouvait en aucun cas être un modèle valide de la représentation interne (mentale) de celui-ci. D'autres auteurs ont rejoint ce point de vue, en insistant que les processus de notre pensée étaient bien le reflet du monde physique et non pas l'inverse, et que les « cartes cognitives » n'étaient qu'un moyen de représentation externe de cette pensée et, de ce fait, un produit parmi d'autres de notre façon de « penser l'espace » (Liben, 1981; Kuipers, 1982, 2003; Golledge, 1999; Tversky, 1993).

Arthur et Passini (1992) tiennent compte, dans leur définition de la notion de « carte cognitive », d'un facteur relatif à la taille de l'environnement. Une « carte cognitive » est alors vue comme une « construction mentale d'un environnement qui ne peut être perçu sur la base d'un seul regard ou point de vue et qui fait appel à un processus cognitif de cartographie mentale (« *cognitive mapping* »). Il s'agirait là d'un processus de « structuration mentale conduisant à la formation de représentations internes ». Ces dernières peuvent alors être externalisées ou communiquées sous une forme ou une autre, au moyen de cartes, de dessins ou de descriptions verbales (Passini, 1994). Down & Stea (1973) proposent une définition un peu plus précise en termes d'une « série de transformations mentales par lesquelles un individu enregistre, décode et rappelle des informations concernant sa position relative dans l'espace et les caractéristiques de son environnement spatial, proche ou lointain ».

III.4.1. Encodage et externalisation des traitements

Selon d'autres chercheurs (Golledge, Klatzky, & Loomis, 1996; Ungar, Blades & Spencer, 1996) l'encodage des données cartographies spatiales et l'acquisition de compétences d'orientation réfère à deux niveaux distinctifs de traitement de l'information, un niveau perceptif et un niveau conceptuel. Au niveau perceptif, une compensation de la perte de vue est fournie par les autres sens, le toucher, l'audition et l'odorat. Au niveau conceptuel, il s'agit de stratégies spatiales appropriées pour une exploration et une navigation efficace dans l'espace. Les deux niveaux de traitement s'appuyent sur la géométrie des routes et celle de leur configuration globale (Fletcher, 1980; Kitchin & Jacobson, 1997). Gärling (1986 c) propose plusieurs étapes distinctes dans le traitement de l'information spatiale. La première étape concerne la perception de l'information au moyen de nos sens et l'encodage dans des registres sensoriels spécifiques et distincts. Ces informations sont ensuite coordonnées, transformées, et recodées dans la mémoire à court terme ou la mémoire de travail. Ces étapes de traitement sont suivies d'un processus de sélection, où certaines informations vont être enregistrées dans la mémoire à long terme.

Dans les processus de traitement des informations spatiales, Sholl (1996) fait la distinction entre la relation personne-objet, qui est dynamiquement modifié quand il y a mouvement (référentiel égocentrique), et les représentations objet-objet, qui sont plus stables. Cette distinction permet d'expliquer pourquoi un individu a du mal, au cours d'une navigation active, de saisir et de comprendre la structure globale de l'environnement, surtout lorsqu'il s'agit d'un environnement à grande échelle. Le raccourci est un bon exemple de ce problème, car un raccourci ne peut être trouvé que dans des conditions d'une relation personne-objet stabilisée, c'est-à-dire lorsque l'individu dispose d'une représentation fiable des variations du référentiel égocentrique pour un trajet donné (Wagener, Wender & Wagner, 1990). Selon Siegel & White (1975) et Pick & Lokman (1981) une représentation de trajet et de la relation personne-objet serait fiable lorsque l'individu se représente bien une configuration globale des routes où les repères et les itinéraires pertinents sont correctement interconnectés.

L'externalisation des traitements cognitifs de l'information spatiale, ou une représentation mentale de l'espace connu ou peu connu, peut se faire au moyen d'un dessin. La capacité relative d'un individu à reproduire un parcours sous forme de dessin est une bonne méthode pour mesurer l'exactitude de leur perception ou de leur mémoire

de celui-ci. Cette méthode est généralement utilisée dans des expériences où on demande à des personnes de dessiner la carte qui représente au mieux une vue en plan de l'environnement qu'ils viennent d'explorer. Ce procédé permet de saisir la perception de la dimension de différents espaces et de l'emplacement relatif des points de repères pertinents (Thorndyke, 1980). Le dessin peut nous renseigner aussi sur le type de stratégie utilisée par l'individu pour traiter et mémoriser l'information spatiale (encodage de repères, représentation de la géométrie des routes ou de la configuration globale etc.). Cependant, tout le monde n'est capable de bien se représenter un espace physique ou de bien externaliser cette représentation, soit en conséquence d'un manque d'expérience, soit parce-que la personne ne sait pas dessiner, par exemple, d'où l'inconvénient de l'utilisation de cette méthode d'externalisation pour sonder la nature et l'exactitude des représentations. En effet, plusieurs études ont montré qu'une personne peut avoir une représentation parfaite de l'environnement mais être dans l'incapacité de traduire cette information sur un papier (Golledge, 1999; Darken, 2001). Selon Passini (1994) un des avantages des dessins serait le fait qu'ils permettaient de reproduire plusieurs des éléments présents dans l'environnement en une image sans nécessité d'expliquer verbalement tous les détails relatifs. Pour l'analyse des dessins, Beck & Wood (1976) ont utilisés une grille régulière afin de déterminer la correspondance de la position des objets du dessin avec celle dans la réalité. Ainsi, les déplacements des repères et des lignes par rapport à leurs véritables positions sont représentés par des courbes sur la grille. Cette grille transformée est ensuite comparée avec la grille d'origine. Cette technique fournie une vue globale des erreurs de représentation cognitive des parcours, repères, distances relatives et directions. Pour Rovine & Weisman (1989), la mesure des représentations cognitives de l'espace s'effectue sur l'exactitude de celle-ci, et ils proposent d'analyser les positions de certains repères importants sur le dessin mental et de les comparer avec la réalité, ce qui donnerait une mesure de la fidélité de leur positionnement et de l'ordre dans lequel ils ont été positionnés.

III.4. 2. La mémoire de travail

L'information spatiale est, comme nous avons pu voir, soumise à un certain nombre de traitements, allant de la sélection sensorielle au stockage dans la mémoire à long terme. Cependant, toutes les informations ne sont pas stockées de façon permanente et

un certain nombre d'entre elles est maintenu dans les structures de la mémoire à court terme (MCT) avant de disparaitre. Cette structure à court terme sert aussi de mémoire de travail provisoire, impliquée dans le traitement et la maintenance des informations nécessaires pour accomplir des tâches cognitives en cours (cf Baddeley, 1986).

D'après Logie (1996), la première description de ce que nous appelons aujourd'hui la mémoire de travail était donnée par le philosophe anglais John Locke en 1690, qui évoque une rétention temporaire de l'information en la maintenant en vue grâce à un processus qu'il a appelé « contemplation ». Locke évoqua aussi l'existence d'un stockage permanent dans une archive qu'il appela « la mémoire ». Plus tard, James (1890), a évoqué un concept similaire de stockage temporaire qu'il nomma « mémoire primaire » en faisant la distinction d'un autre système de stockage permanent, la « mémoire secondaire ». Ces concepts ont été repris par Waugh & Norman (1965), qui se sont focalisés sur l'existence de cette dualité, surtout en ce qui concerne la durée de rétention, qui est limitée dans le cas de la mémoire primaire. Ces auteurs ont également introduit la notion de « répétition mentale verbale » qui selon eux était le seul moyen de maintenir une information en mémoire.

Sur la base de données issues d'expériences antérieures (Miller, 1956; Brown, 1958; Sperling, 1960), Atkinson et Shiffrin (1968) ont élaboré un modèle du traitement de l'information et de la mémoire composé de trois modules de traitement. Selon ces auteurs, les informations en provenance du monde extérieur sont traitées grâce aux registres sensoriels, où elles sont maintenues sous forme de représentation sensorielle éphémère pendant un très court laps de temps. Puis ces informations passent par un traitement de second niveau dans la mémoire à court terme où elles sont encodées après répétition verbale dite « phonologique ». La capacité de cette mémoire est limitée à l'empan mnésique des fameux 7± 2 éléments unitaires (« *Miller's magic 7* »), les informations étant retenues pendant ± 30 secondes. Après ce temps, elles sont ou non transmises à la mémoire à long terme sur la base d'un mécanisme de sélection.

Selon le modèle d'Atkinson & Shiffrin (1968), une lésion cérébrale atteignant une localisation du cerveau fonctionnellement identifiée affectera le niveau de traitement assuré par cette fonction ainsi que tous les traitements qui suivent. Cependant, certains travaux ont montré que des patients avec une atteinte cérébrale correspondant à une mémoire à court terme lésée préservaient la mémoire à long terme (Seron, 2007). Cette observation met en cause l'hiérarchie sérielle du modèle d'Atkinson et Shiffrin et donne profit à d'autres modèles de mémoire de travail, comme par exemple celui proposé par

Baddeley & Hitch (1974). Dans ce modèle, la mémoire est aussi conçue comme une structure hiérarchisée, s'articulant sur la base de trois systèmes : un processeur central et deux composantes « esclaves » constituées d'une boucle phonologique et d'un calepin visuel-spatial. C'est ce dernier modèle que nous exploiterons d'avantage par la suite.

Propriétés générales de la mémoire de travail

La mémoire fut considérée, dans un premier temps, comme une archive de stockage, étudiée sur la base de l'étendue des oublis. Vous ne vous rappelez plus les indications verbales qu'une personne vous avait données pour vous aider à retrouver votre chemin ? Vous les avez pourtant répétées dans votre tête à l'instant où vous cherchiez votre agenda pour les noter. Cependant, vous êtes incapable et étonné de ne pouvoir plus vous rappeler ces indications. Ce type d'oubli se produit assez souvent quand il s'agit de se rappeler d'évènements dans un laps de temps relativement court. Une des caractéristiques de la mémoire à court terme ou de la mémoire de travail réside en la durée de rétention des informations. Le maintien de l'information dans la mémoire à court terme dure quelques secondes seulement. Brown (1958) et Peterson & Peterson (1959) avaient mis en en évidence cette propriété. Dans leurs expériences Peterson & Peterson (1959), avaient demandés à des personnes de retenir plusieurs lettres à la fois et de les restituer après un délai entre 0 et 18 secondes. Les résultats de cette expérience ont montrés que les sujets n'avaient aucun problème pour restituer les lettres. Cependant, lorsqu'une interférence comme, par exemple, une instruction de compter à rebours à partir d'un nombre le plus rapidement possible, à été rajoutée entre la présentation des lettres et leur rappel, les performances de mémorisation et de restitution diminuaient. Ces résultats montrent le rôle important de la répétition mentale dans le passage de l'information de la mémoire à court terme à la mémoire à long terme. La tâche d'interférence interagissait avec le processus de répétition mentale, bloqué par le comptage à rebours. Ainsi s'explique l'incapacité des sujets à reproduire les performances initiales en condition de tâche ajoutée.

Une autre propriété qui caractérise la mémoire de travail est sa capacité de stockage. Comme nous déjà évoqué ci-dessus, la mémoire de travail a une capacité de stockage limitée et non durable dans le temps. Miller (1956) à quantifié cette capacité de stockage de la mémoire à court terme sur la base d'expériences où il était demandé aux sujets de mémoriser une liste de mots et de restituer la liste mémorisée dans l'ordre de

lecture. Miller considère que le rappel d'une lettre ou d'un mot utilise des mécanismes identiques car, dans les deux cas, le sujet utilise une unité dite « mnésique ». Miller nomma cette unité mnésique « *chunk* » et ainsi une lettre ou un mot retenu en MCT correspondrait donc à un seul « *chunk* ». Lors d'une tâche de rappel d'une suite de 3 lettres et lors d'une tâche de rappel de 3 mots, la performance de rappel était, en effet, la même. L'empan mnésique correspond donc à la capacité de se rappeler la série d'items la plus longue. Ainsi, la capacité mnésique de la MCT est estimée en moyenne de 7 (+/- 2) items, donc de 5 à 9 *« chunks »*.

D'autres recherches ont porté sur les effets de position sérielle. Lors du rappel de mots ou de chiffres, les différents auteurs ont évoqué des effets de primauté et de récence. Dans les expériences réalisées sur ces effets, les sujets devaient rappeler les mots dans l'ordre de leur apparition. Les résultats ont montré que les sujets étaient capables de se rappeler des mots qui se trouvaient au début et à la fin des listes. Waught & Norman (1965), ou encore Atkinson & Shiffrin (1968), expliquent l'effet de primauté comme étant la conséquence d'un stockage de l'information en mémoire à long terme (MLT), alors que l'effet de récence serait la conséquence d'un stockage en mémoire à court terme (MCT). Le premier effet serait imprimé en MLT au moyen d'un processus de répétition soutenue en MCT, qui favoriserait le passage en MLT des derniers mots d'une liste.

On s'intéressera ici non pas à la durée de la mémoire de travail mais à sa capacité et aux effets de position sérielle. Lorsqu'un individu explore un environnement urbain complexe au moyen d'une carte 2D ou au moyen d'une représentation virtuelle de ce dernier, et qu'on lui demande de naviguer à travers celui-ci dans le monde réel ou virtuel, la capacité d'enregistrement sériel d'informations spatiales en mémoire de travail sera limitée.

Modèle théorique de Baddeley et Hitch (1974)

Le modèle de Baddeley et Hitch (1974) est passé par plusieurs phases d'évolution depuis la publication de sa première version en 1974 (Baddeley, 1986, 1990, 1992; Baddely & Logie, 1999). Dans ce modèle, la mémoire de travail est conçue comme une structure à trois systèmes : deux sous-systèmes « esclaves », dont une boucle phonologique, qui assure un stockage temporaire des données verbales, et un calepin visuel-spatial, qui assure le stockage et le codage des informations visuelles locales, des

images et scènes visuelles du monde physique et des références spatiales entre objets. Ces deux sous-systèmes sont dits « esclaves » car ils sont sous la supervision d'un système de contrôle central appelé Administrateur Central (AC). Ce système « maître » coordonne les deux sous-systèmes en gérant la répartition des ressources attentionnelles limitées entre ces sous-systèmes et assure la fonction d'interface au moyen d'une mémoire à long terme. La première version de ce modèle est présentée sur la Figure 6.

***Figure 6* : La version initiale du modèle de Baddeley et Hitch (1974)**

L'Administrateur central (AC) gère donc le stockage d'informations en mémoire à long terme et le contrôle attentionnel en coordonnant les informations venant des sous-systèmes « esclaves ». Il gère aussi la sélection stratégique des informations et actions les plus efficaces. Il joue donc un rôle majeur non seulement au niveau de l'attention, mais aussi dans la planification et la coordination de comportements (Baddeley, 1992b; Morris & Jones, 1990). Comme la structure exécutive d'un groupe, il rassemble des informations diverses en provenance de sources différentes. Cependant, ce système a une capacité de traitement limitée et ne peut prendre plusieurs décisions simultanément. Il fonctionne donc selon en mode de traitement sériel (Baddeley, 1996).

La boucle phonologique de cette mémoire de travail est censée stocker temporairement, au moyen d'un registre sensoriel pertinent (auditif), l'information verbale ou écrite. La boucle phonologique est ainsi constituée de seulement deux composantes, à savoir une qui reçoit les informations verbales présentées auditivement pour assurer un stockage phonologique pendant une durée très brève : de 1,5 sec à 2 sec. Ces informations peuvent êtes maintenues au moyen de la deuxième composante, la boucle de contrôle phonologique, fondée sur une récapitulation articulatoire (« *rehearsal* ») de phrases verbales ou textuelles. Cette composante de contrôle gère

donc la réactivation et le maintien à court terme des items dans le registre phonologique. Elle permet ainsi l'encodage sous une forme phonologique des mots parlés et écrits, d'images mentales et tout autre matériel internalisé (Gathercole & Baddeley, 1993) (Figure 7). On note ici que cette version du modèle de la mémoire de travail ne tient pas compte d'un traitement des informations au moyen du toucher et a donc besoin d'être aménagée pour tenir compte des entrées de nature tactile, qui sont prédominantes chez les aveugles congénitaux car ils n'ont jamais traité d'informations visuelles.

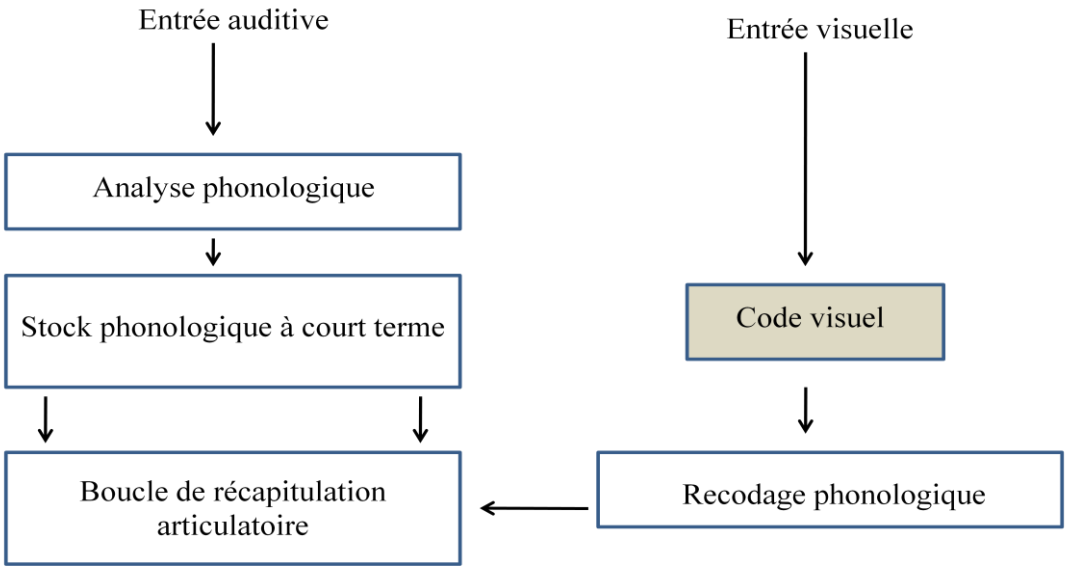


***Figure 7*: Les différentes composantes et instances de traitement du sous-système « boucle phonologique »**

Les travaux de Gathercole et Baddeley (1993), montrent que le temps de prononciation peut être interprété en termes de boucle phonologique. Des noms de pays tels que « Suisse » ou « Grèce », prononcés assez rapidement, seront maintenus en mémoire de travail plus aisément et malgré d'autres interférences, tandis que des noms tels que « Tchécoslovaquie » ou « Guatemala », qui ne sont pas prononcés aussi rapidement, seront moins facilement maintenus dans le registre phonologique, surtout lorsqu'il y a interférence avec d'autres termes à mémoriser ou à rappeler. Dans ces situations, le contexte et l'expérience particulière du sujet peuvent faciliter le traitement de l'information par la mémoire à court terme. Ainsi, dans une assemblée internationale

où tous les participants doivent s'exprimer en anglais au sujet de la Guerre du Golfe, les journalistes anglo-saxons seront avantagés au jeune touriste français, même astucieusement équipé de son (« *I-pod »),* qui ne parle pas bien anglais et ne se rappelle pas ce qu'était la Guerre du Golfe.

Le sous-système nommé « calepin visuel-spatial », la deuxième composante esclave du modèle, elle est spécialisée dans le stockage temporaire de l'information visuelle et spatiale mais aussi de l'information verbale encodée sous la forme d'images mentales en vue de leur traitement et manipulation interne. Ce calepin a donc une composante visuelle et une composante spatiale et tout comme la boucle phonologique une capacité limitée (Frick, 1988). Quand il y a un trop grand nombre d'items à l'entrée de ce sous-système, il est souvent impossible de les filtrer de manière sélective pour aboutir à une représentation à court terme des informations sélectionnées, sauf dans certains cas exceptionnels de recherche attentionnelle hautement sélective (*selective visual search*) sur la base d'un seul critère, comme localiser seulement les éléments bleus présentés dans un grand ensemble d'éléments colorés, par exemple. Dans ce cas particulier, le sujet sait donc bien ce qu'il cherche et les effets de distraction sont minimisés.

Ce sous-système a pour fonction de maintenir temporairement des informations dans le registre visuel, sachant que toute information à ce niveau de traitement est sujette au déclin. Cependant, elles peuvent être réactualisées au moyen d'un processus de récapitulation spatiale (Logie, 1995) dans la planification des mouvements en général et surtout dans l'exécution répétée de mouvements orientés vers une cible, par exemple. Les deux composantes distinctes, une visuelle et l'autre spatiale, doivent être coordonnées dans une tâche de mémoire de travail visuelle, par exemple, pour bien maîtriser les interférences, surtout celles de nature visuelle plutôt que celles de nature spatiale (Logie & Marchetti, 1991).

Le calepin visuel-spatial intervient dans la plupart des activités cognitives complexes telles que la lecture, la compréhension des textes, la production du langage, l'acquisition des nouvelles connaissances, ou la résolution des problèmes de manière générale (Ehrlich & Delafoy, 1990; Gaonac'h & Larigauderie, 2000). Lindberg & Gärling (1981) ont été parmi les premiers à montrer que l'apprentissage d'un itinéraire ou d'un parcours mettait en jeu des traitements cognitifs assimilables à un tel système de mémoire de travail, à capacité limitée de stockage et de traitement, dans l'espace et dans le temps. La dernière version (Baddeley, 2003) du modèle initial est illustrée dans la Figure 8.

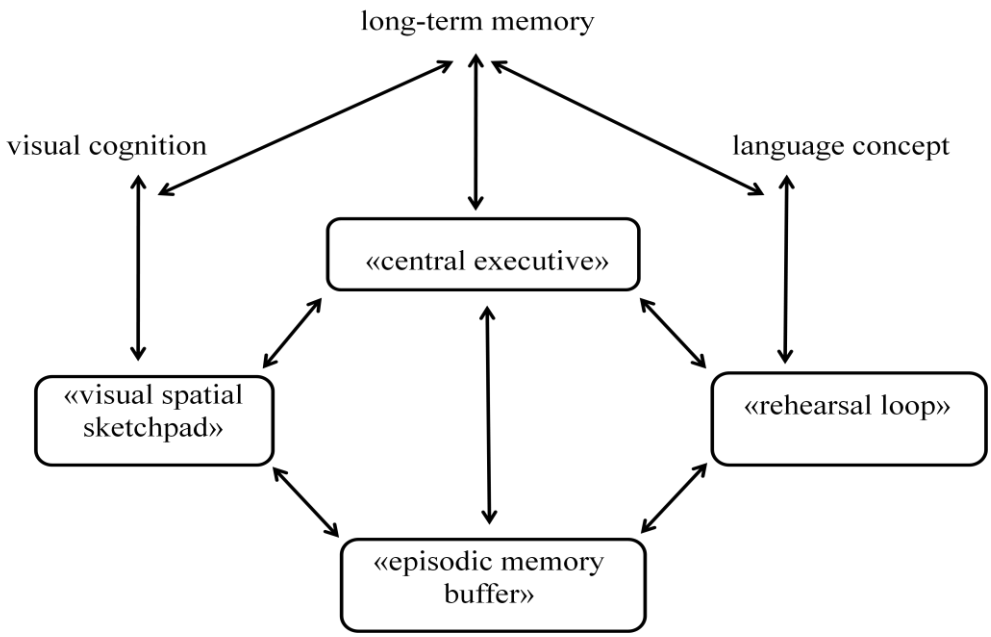


***Figure 8* : La dernière version du modèle de la mémoire de travail selon Baddeley (cf 2003)**. *Cette version rend explicite les relations entre mémoire à long terme, langage et cognition visuelle au niveau de l'Administrateur Central (« central executive ») et des interactions multiples (cf flèches) entre les trois sous-systèmes de base, auxquels Baddeley a choisi d'ajouter un quatrième qu'il appela « filtre de la mémoire épisodique » (« episodic memory buffer »). Au moyen de ce sous-système de filtrage, les informations encodées dans le calepin visuel-spatial (« visual spatial sketchpad ») d'une part et au moyen de la boucle phonologique (« rehearsal loop ») d'autre part, sont sélectionnées, coordonnées et intégrées. On constate qu'il manque toujours un registre tactile à ce modèle.*

IV. APPROCHE EXPERIMENTALE----------

Afin d'élargir notre connaissance relative aux différentes types d'informations, sensorielles et conceptuelles, exploitées dans la planification mentale de parcours, la sélection de repères et la navigation en environnements complexes à moyenne ou grande échelle, comme les grands parcs ou les grandes villes, nous avons réalisé une série d'expériences, sur le terrain d'une part (expériences 1, 2 et 3) et en environnement virtuel généré par ordinateur (expérience 2) d'autre part. Les effets du type d'informations données aux sujets lors d'une phase de familiarisation avec des parcours non-connus, au moyen de dispositifs de différente nature, ont été étudiés en tenant compte d'un facteur de complexité relative des parcours.

----------EXPERIENCE 1

Expérience sur le terrain du cimetière Père Lachaise à Paris

Retrouver son chemin dans un milieu naturel complexe et non-familier

La navigation à travers un nouvel environnement est une tâche complexe, qu'une personne accomplit souvent dans la vie de tous les jours. Il a été montré que retrouver un chemin dans un environnement non-familier était facilité par une expérience préalable au moyen d'une exposition directe et guidée (Levine, Warach, & Farah, 1985). Cependant, avant d'effectuer un déplacement dans un nouvel environnement, il n'est souvent pas possible d'avoir une expérience directe avec celui-ci. Par conséquent, la sélection d'un parcours et la planification de l'itinéraire est généralement accomplie à l'aide d'informations issues de sources indirectes, ou d'outils d'aide spécifiques à la navigation. Les fonctions cognitives, telles que l'attention, la perception, et la mémoire sont hautement sollicitées dans la sélection et l'analyse d'informations pertinentes qui mènent à une compréhension des lieux et une représentation mentale efficace permettant d'explorer au mieux l'environnement inconnu.

La compréhension de l'espace peut être véhiculée à travers des outils traditionnels d'aide à la navigation tels qu'un plan de route 2D, ou à travers des outils de visualisation plus sophistiqués, qui reproduisent plus ou moins fidèlement la topologie du monde réel sur un écran d'ordinateur, par exemple. Ces différents outils pourraient plus ou moins faciliter la tâche d'orientation en fournissant une interface visuelle entre la représentation mentale (interne) de l'espace et de l'environnement externe (Barkowsky & Freska, 1997). Réussir une stratégie de navigation dépend, au final, de la manière dont les connaissances spatiales sont mises à disposition par un outil donné et comment elles sont ensuite exploitées pour construire des représentations dans la mémoire de travail afin de permettre des décisions appropriées. Ces représentations doivent être suffisamment fiables pour permettre à une personne de retrouver son chemin à travers un nouvel environnement, aussi rapidement que possible et sans se perdre.

Une variété de facteurs, tant personnels qu'environnementaux, est en cause lorsqu'une personne tâche de retrouver son chemin (Prestopnik & Roskos-Ewoldsen, 2000). Les facteurs personnels incluraient des caractéristiques spécifiques, telles que le sexe, la familiarité relative avec un environnement donné, ou avec la navigation de façon générale, et des stratégies préférées. Par exemple, les individus qui s'appuient préférentiellement sur des connaissances basées sur la géométrie des routes se trouvent facilement perdus lorsqu'ils se sont éloignés de la route apprise (Lawton, 1994). Tandis que quelques uns sont de bons utilisateurs de cartes visuelles, d'autres préfèrent les indications verbales. Des descriptions verbales structurées d'itinéraires ainsi que des

repères locaux semblent fournir des supports particulièrement efficaces pour aider le navigateur humain à construire des représentations cognitives d'une nouvelle route (Denis, 1997; Denis & Briffault, 1997; Denis *et al*, 1999). Les facteurs environnementaux qui peuvent influencer la capacité individuelle à retrouver son chemin incluraient la densité relative des constructions dans l'environnement, la disponibilité de repères significatifs, la géométrie ou la disposition des rues et de leurs intersections. Les travaux de Denis *et al* (1999) ont montrés des différences interindividuelles dans l'exploitation des descriptions décrites verbalement, comparées aux plans 2D visuels. Devenir capable d'utiliser des plans 2D visuels requiert des compétences pour établir des correspondances d'objets entre le plan et la topologie du monde réel et, donc, pouvoir apparier le plan à l'environnement dans l'espace mental (Rovine & Weisman, 1989; Newcombe & Huttenlocher, 2000). De telles compétences peuvent être plus ou moins difficiles à acquérir. Il a été montré, par exemple, que les individus enregistrent de différentes manières les connaissances spatiales acquises au moyen de plans visuels. Cette constatation a été mise en évidence en comparant les stratégies basées sur des plans et celles basées sur une exposition directe et guidée de l'environnement (Levine *et al*, 1985). D'autres travaux ont montrés que les cartes visuelles 2D et l'expérience directe étaient toutes deux bénéfiques, et de façon comparable, à une personne en déplacement (Ishikawaa *et al*, 2008). De tels effets bénéfiques se reflètent par le nombre d'arrêts au moment de la navigation, qui est alors réduit, ainsi que par des distances et des temps plus courts pour arriver d'un point de départ au point d'arrivée. La comparaison se fait par rapport à une situation contrôle, où les sujets devaient naviguer sans aucune aide ou expérience au préalable.

Trois types de connaissances sont pertinentes pour les stratégies de planification de parcours : les repères (« *landmark knowledge* »), les routes (« *route knowledge* ») et la configuration globale des lieux (« *survey knowledge* »). La compréhension de l'espace à travers ces différentes connaissances est cruciale pour l'élaboration de critères de décision pertinents concernant quand et dans quelle direction il faut tourner (Siegel & White, 1975). Les traitements sensoriels et cognitifs mis en jeu par les trois formes de connaissance de l'espace évoqué ci-dessus et la mesure dans laquelle ils permettent à l'individu de construire une représentation mentales fiable de l'environnement doivent être clarifiés d'avantage (Zhang, 2008). Par exemple, on ne sait que peu sur l'avantage relatif qu'offre la connaissance des repères, des routes et des configurations globales, ou sur l'importance relative de ces différentes connaissances dans des environnements

différents tel que les forêts, les villes ou encore les parcs, construits et aménagés de manières différentes. La complexité relative des itinéraires devrait aussi avoir une influence déterminante. En effet, la complexité des parcours n'a pas été prise en compte ou étudié de manière systématique dans les études précédentes, ce qui paraît surprenant car ce facteur en lui seul devrait générer un effet direct sur les processus de la mémoire de travail, dont la capacité semble assez limitée. Les effets de ces limitations sur l'acquisition et la structuration mentale des connaissances spatiales relatives aux environnements complexes et à grande échelle sont encore très mal connus.

La connaissance des routes est généralement liée à la géométrie et la disposition spatiale d'un itinéraire. Elle permet de décider dans quelle direction aller, où tourner, ou par quel chemin se rendre d'un endroit à un autre. Il a été observé (Sun, Chan & Campos, 2004) qu'un plan 2D visuel offrait les informations sur les dispositions spatiales des routes et des intersections les plus efficaces pour la navigation comparé à celles issues d'une expérience directe ou d'une représentation virtuelle de l'environnement réel. L'observation de l'effet dit d'alignement spécifique (Sun *et al*, 2004) dans l'exploitation de plans 2D visuels suggère que la précision avec laquelle la géométrie des routes ainsi que leur configuration spatiale sont représentées sur un tel plan était d'une importance cruciale.

La connaissance des repères est liée à la représentation de caractéristiques distinctes d'objets éminents tels que des bâtiments, des monuments, ou encore des boutiques se trouvant le long d'une route donnée dans une ville. Pouvoir exploiter la connaissance de repères implique une connaissance de la position actuelle « où suis-je ? » pour la construction mentale d'itinéraires « où dois-je aller après ». Il convient de souligner ici que certains auteurs utilisent le terme 'repère' d'une manière très générale pour se référer à n'importe quel point de décision dans l'espace (cf Golledge, 1999).

Les repères peuvent aider l'organisation de l'espace en termes de points de référence, ou points de choix, où les décisions de déplacement sont faites et l'origine et la destination sont identifiées. Elles peuvent représenter des blocs d'objets à un niveau très élevé d'abstraction ou d'échelle, ou servir de points d'ancrage pour la compréhension des relations spatiales locales. Aussi, elles peuvent permettre d'évaluer les relations spatiales entre les objets et les routes, améliorer à priori la connaissance des routes et faciliter ainsi la construction de cartes cognitives. L'exploitation des repères pour la construction des connaissances relatives à la configuration de l'environnement ou de l'itinéraire peut faciliter l'orientation spatiale, la découverte de routes alternatives, et la

discrimination entre différentes régions (cf Golledge, 1999; Janzen *et al*, 2007). Les représentations mentales de routes, de repères et de régions constituent précisément ce que Tolman (1948) a appelé une carte cognitive de l'environnement physique, construite de façon hiérarchique, groupant différentes caractéristiques de l'espace et certaines dispositions complexes de celui-ci en différents niveaux de représentation.

Une compréhension spatiale dérivée de représentations virtuelles d'un environnement réel apparait largement lié à l'encodage visuel de repères critiques (cf Ohmi, 1996), que les utilisateurs peuvent explorer à l'échelle de l'espace virtuel en vue d'une utilisation dans le réel. Cependant, les représentations virtuelles ont un inconvénient majeur lié au fait qu'elles réduisent, en fonction de la taille de l'écran, le champ perceptif et privent l'utilisateur de ses repères vestibulaires, kinesthésiques, et proprioceptifs, tous fort utiles pour naviguer dans le monde réel (Ohmi, 1996; Berthoz & Viaud-Delmon, 1999). Quelques travaux seulement ont pu montrer que les connaissances spatiales acquises au moyen de représentations virtuelles étaient assez bien transférées vers la navigation dans le monde réel (Witmer *et al*, 1996; Arthur, Hancock & Chrysler, 1997). D'autres travaux ont montré que la carte visuelle 2D et les représentations virtuelles sur un écran peuvent être utiles pour la construction de représentations spatiales de manière plus générale (Liben, 2001; Meilinger *et al*, 2008). Récemment, Ishikawaa *et al* (2008) ont trouvé qu'un GPS sur un système mobile était totalement inefficace pour retrouver un chemin en comparaison avec une expérience directe guidée ou l'exploration d'un plan 2D visuel avant navigation.

Dans la première expérience de cette thèse, nous avons étudié l'efficacité relative des trois connaissances spatiales évoquées ci-dessus : repères, routes et configurations dans une tâche de navigation dans les allées du cimetière du Père Lachaise à environnement semblable à un parc (le cimetière du Père Lachaise à Paris).

IV.1.1. MATERIEL ET METHODES

Participants

Sur la base d'un appel à volontaires, 24 personnes ont accepté de participer à notre étude, dont 12 hommes et 12 femmes (adultes). Tous les volontaires étaient professionnellement actifs et aucun d'eux n'avait signalé une atteinte neurologique ou un déficit moteur. Tous les sujets étaient donc sains et entièrement mobiles. Ils avaient entre 22 et 50 ans. Une des exigences de l'expérience était de ne pas avoir visité les lieux, c'est-à-dire le cimetière du Père Lachaise, auparavant. Pour constituer des mesures de performances de référence, trois des expérimentateurs ont acquis au préalable une connaissance des lieux relatifs aux deux parcours et ont réalisé ces parcours lors d'une navigation « test » comme « experts », capables de naviguer rapidement, mais sans courir, et sans faire d'erreurs ou se perdre.

Parcours

Le cimetière Père Lachaise est constitué d'un réseau complexe de petits et grands chemins, aménagés pour les piétons, ainsi que de grands espaces verts, de petits sentiers naturels avec des arbres, de chapelles, de monuments et, bien entendu, des tombes qui rappellent les noms des personnes souvent célèbres, enterrées dans ce lieu. La figure 9 montre une représentation en 2D des deux parcours que nous avons sélectionnés pour cette expérience, enrichie de photographies de repères potentiels se trouvant au long de ses parcours. Les parcours ont été sélectionnés, avec un point de départ commun situé à l'entrée principale. L'un d'eux peut être décrit comme relativement « simple » car il couvre une distance relativement courte et peut-être représenté par une géométrie linéaire simple, et requiert pour aller du point de départ jusqu'au point d'arrivée (une fontaine), un seul virage à gauche avec un espace relativement ouvert avec quelques routes et intersections. L'autre parcours peut être décrit comme plutôt « complexe », couvrant une distance deux fois plus grande et requiert plusieurs choix, en termes de virages, pour rejoindre la destination (une autre fontaine). Le parcours complexe mène à travers un réseau complexe de petites routes avec des intersections au milieu d'une forêt relativement dense. Un emplacement intermédiaire critique (« la chapelle ») sur ce parcours a été indiqué lors des consignes communiquées aux participants, ainsi que « la

fontaine au bout du parcours », sachant que les points de destination des deux parcours n'étaient pas visibles à partir du point de départ, ni la chapelle à mi-chemin du parcours complexe.

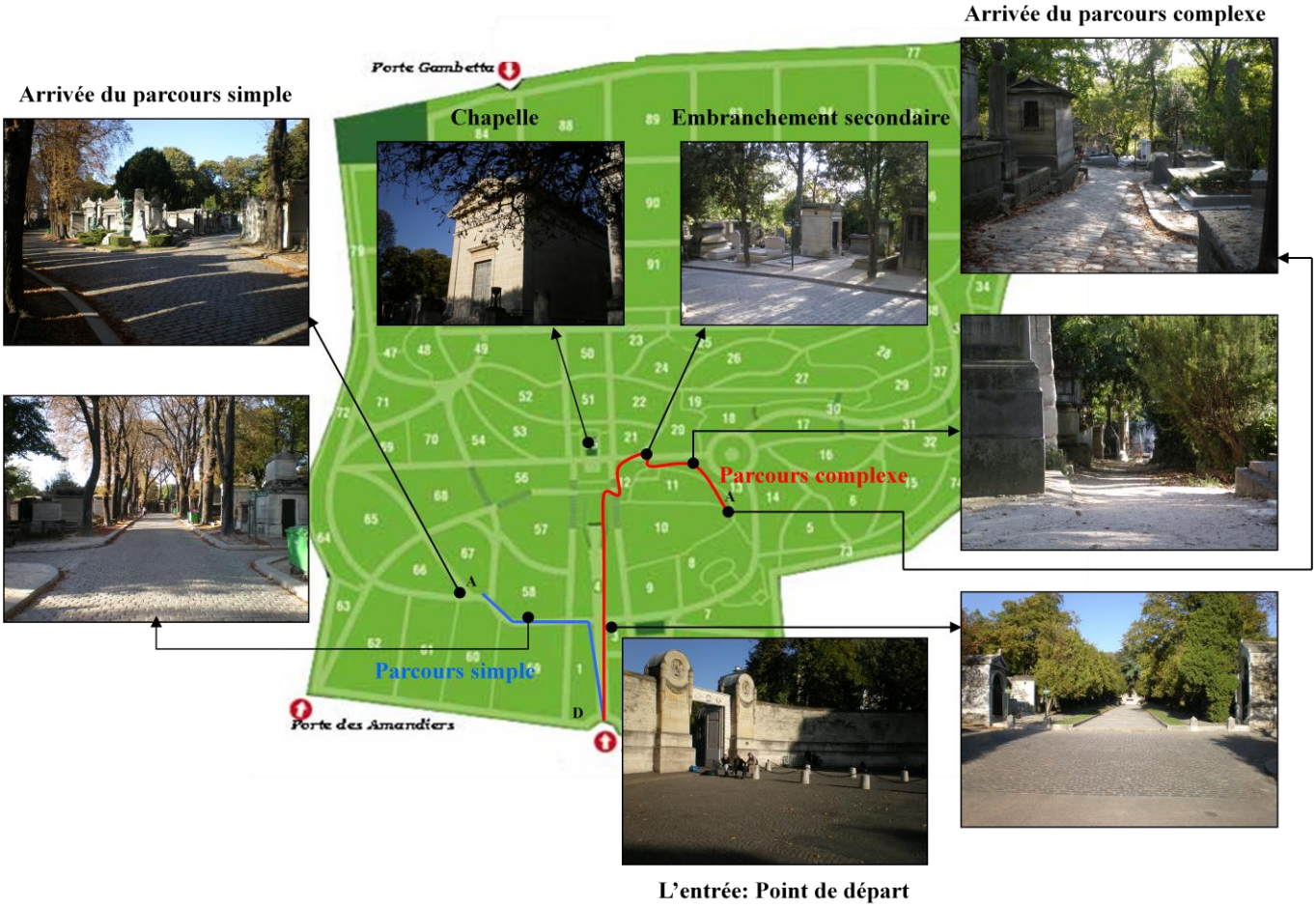


Figure 9 ***: Représentation de la géométrie des parcours « simple » et « complexe » sur un plan 2D coloré et en cela différent du plan monochrome utilisé dans l'une des conditions de cette étude****. Aussi, cette représentation ici a été enrichie, pour illustration, des photographies de repères potentiels se trouvant au long des deux itinéraires.*

Familiarisation par visite guidée silencieuse

Huit des 24 participants ont eu une visite guidée silencieuse du parcours qu'ils devaient ensuite refaire seuls. Quatre des participants (deux femmes, et deux hommes) ont été guidés jusqu'à la fontaine tout au long du parcours simple, les quatre autres

(deux femmes, et deux hommes) jusqu' à l'autre fontaine tout au long du parcours complexe. La visite guidée silencieuse consistait à accompagner les participants du le point de départ jusqu'à la destination ainsi qu'au retour par le même chemin. On rencontre tout au long des parcours simple et complexe des sculptures, des tombes en pierre, et d'autres repères potentiels tels que les panneaux indiquant les répartitions des parcelles du cimetière, par exemple. Au point de départ des parcours, l'entrée principale s'ouvre sur une grande route, menant d'abord à un monument de guerre impressionnant et par la suite au point de destination du parcours complexe. Un des repères clé sur le parcours complexe était une grande chapelle entourée de fleurs.

Visite virtuelle

Un autre groupe de huit participants a eu une visite guidée virtuelle avant le test de navigation. La visite virtuelle consistait en une navigation sur le site [1]web du Père Lachaise (Voir Figure 10), guidée par un expérimentateur, aussi de manière silencieuse et à l'aide d'une souris d'ordinateur. Les sujets naviguaient d'une image panoramique à l'autre des parcours affichés sur un écran d'ordinateur, visualisant ainsi le chemin qu'ils devaient retrouver après seuls dans l'environnement réel. Quatre participants (deux femmes et deux hommes) ont été guidés sur le parcours simple (aller-retour), les quatre autres (deux femmes et deux hommes) sur le parcours complexe (aller-retour). Dans cette condition de visite virtuelle, un parcours donné était représenté sur un écran d'ordinateur au moyen de vues panoramiques successives à 360° (Technologie [2]Quick Time™). Les clics successifs de la souris sur des flèches, indiquant les directions disponibles, permettent une navigation étape par étape à travers ces vues successives projetées en 3D. Le caractère « guidé » de cette visite était caractérisé par une assistance silencieuse de l'expérimentateur, qui prenait la main du sujet afin de la faire cliquer sur le bouton de la souris au fur et mesure de l'avancement sur le parcours ainsi visualisé.

Il convient de mentionner qu'au moment de ces expériences à Paris au Père Lachaise, la plupart des tombes étaient décorées avec des ornements particuliers et bien distincts, telles que des couronnes avec des rubans, contenant des noms et autres textes.

[1] www.perelachaise.com.

[2] Le Quick Time VR, veut dire un assemblage d'une succession d'images prises à 360° De l'environnement, afin d'en générer une bande circulaire que l'on fait tourner à l'aide de sa souris.

Ces caractéristiques ne sont pas permanentes et de ce fait n'ont pas pu servir lors d'une familiarisation des lieux par visite virtuelle ou plan 2D.

Pour notre expérience, un zoom sur écran plein (écran 15 pouces) a été activé afin de cacher la carte 2D et l'index des rues. Les fonctions interactives de l'environnement virtuel ont permis aux participants d'avoir accès à des vues panoramiques sur 360° d'un itinéraire donné et de son environnement immédiat. Ceci pouvait être réalisé en déplaçant la souris à droite ou à gauche à n'importe quelle moment/position avant de continuer le parcours en cliquant sur la flèche rouge, qui indique la direction. Aussi, les flèches rouges n'indiquent pas les tournants en pointent uniquement vers leurs direction, ce qui rend l'échelle de l'environnement et les distances relatives entre routes et repères potentiels particulièrement difficile à estimer. De plus, l'expérimentateur avait parfois besoin de réajuster le point de vue d'une image panoramique donnée pour rendre disponible la direction nécessaire pour avancer sur un parcours donné en déplacement virtuel.

Figure 10 ***: Une représentation du site web du cimetière du Père Lachaise à Paris (www.père-lachaise.com)****. Dans la condition expérimentale « visite virtuelle » (une prise de vue panoramique du point de départ des deux parcours est montrée dans la partie supérieure gauche de cette image), le plan à droite et l'index en bas à gauche n'étaient pas visualisés.*

Plans visuels 2D

Huit des 24 participants (quatre hommes et quatre femmes) ont exploré un plan 2D de leur parcours avant de naviguer dans l'environnement réel.

Ces plans étaient correctement mis à l'échelle et reproduisaient de façon fiable les distances relatives entre emplacements. Ils étaient imprimés sur une feuille A4. Sur ces plans, les points de départ, les emplacements intermédiaires ainsi que les points d'arrivée des parcours étaient indiqués (Figure 11). Les trajectoires à suivre n'étaient pas mises en évidence par un tracé particulier. Les participants dans cette condition avaient deux minutes pour explorer le plan, ce qui correspondait à un temps d'exposition estimé largement suffisant par chacun(e).

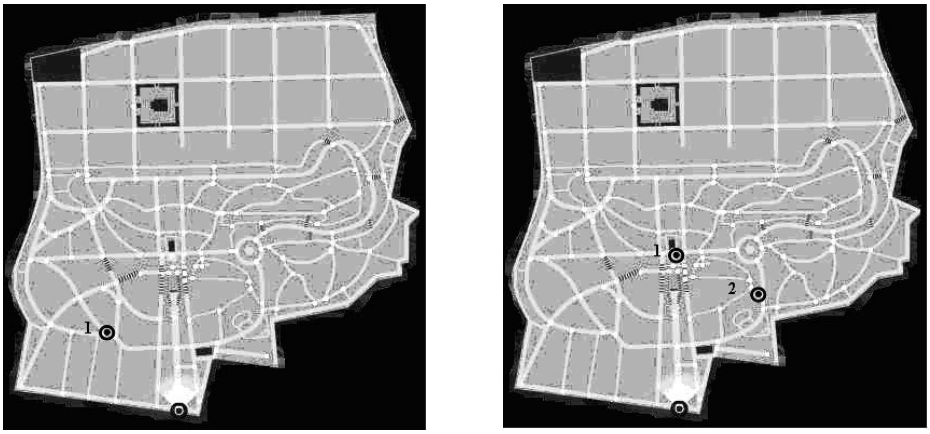


Figure 11 : Les plans 2D des parcours simple (à gauche) et complexe (à droite)*. Leur point de départ commun est indiqué en bas du plan. Le 1 représente le point d'arrivée du parcours simple ou le point intermédiaire du parcours complexe. Le point d'arrivée de ce dernier est représenté par le 2.*

Suivi des trajets individuels par GPS

Afin de pouvoir suivre, enregistrer et tracer les parcours effectués par les participants, un téléphone mobile équipé d'un récepteur GPS a été utilisé. Le logiciel GPSed ™ nous a permis ensuite d'exporter, sous un format générique appelé « GPX » les données enregistrées lors de la navigation au moyen du GPS. Le logiciel EveryTrial™ nous a permis ensuite de lire ce format « GPX » nous renseignant ainsi

sur l'itinéraire, le temps de parcours, la distance parcourue ainsi que la vitesse de déplacement de chaque participant, sur lesquelles nous avons pu faire des analyses statistiques. Il est important de faire remarquer ici que les arbres dans la zone d'étude n'étaient pas un obstacle à la localisation par GPS car la densité du feuillage à ce moment là était à son plus bas niveau (Novembre 2008).

Procédure expérimentale

Après une expérience directe par visite réelle guidée, ou une expérience indirecte au moyen d'une visite virtuelle ou de l'exploration d'un plan 2D, le participant a été placé au point de départ à l'entrée principale et devaient naviguer seuls et de mémoire pour aller du point de départ jusqu'au point d'arrivée. Une petite pochette contenant le dispositif de suivi par GPS a été placé autour de leur cou avec l'instruction de ne pas y toucher. Chaque participant avait son téléphone pour appeler l'un des expérimentateurs dans le cas où ils étaient perdus définitivement. Les participants qui ont réussi le parcours étaient accueilli par un autre expérimentateur au point d'arrivée, leur GPS était arrêté et récupéré par ce dernier. A la fin de la phase de navigation test, chaque participant était interrogé sur les stratégies qu'il pensait avoir utilisé et les repères spécifiques qui lui avaient semblés importants.

IV.1.2. RESULTATS

Lors de l'analyse des résultats de cette étude, les performances des participants dans les différentes conditions ont été évaluées au moyen des données GPS relatives aux distances parcourues, aux temps mis pour se rendre du point de départ jusqu'au point d'arrivée, ainsi qu'aux erreurs d'itinéraire. Les performances individuelles ont été analysées en fonction du type d'aide ou de familiarisation préalable avec le parcours (avant test de navigation) et en fonction de la complexité de l'itinéraire parcouru, et seront comparés aux données des « experts ».

Tous les participants ont réussi à retrouver la fontaine, le point d'arrivée du parcours simple, sans différences de performance observées dans les différentes conditions de familiarisation.

Pour ce qui concerne le parcours complexe, on a observé des déviations très grandes par rapport à l'itinéraire optimal dans les tracés GPS des différents participants, ce qui devient encore plus évident en comparant avec ceux des « experts ». Les tracés GPS individuelles sont montrés dans la Figure 12. D'autres analyses de performance en termes de paramètres complémentaires, tels que le temps de navigation à partir du point de départ, la distance parcourue, la vitesse moyenne de déplacement ainsi que le nombre d'erreurs commises (mauvais tournants) ont été ensuite effectuées en fonction du type d'aide utilisé pour familiariser les sujets avec un parcours donné.

Temps, distance, vitesse de déplacement, et nombre de mauvais tournants

Pour chaque participant, on a obtenu le temps, la distance totale parcourue ainsi que la vitesse moyenne de marche pour chaque itinéraire donné. Le nombre de fois qu'un participant faisait une erreur en empruntant un mauvais itinéraire qui l'éloignait du bon parcours vers le point d'arrivée (par exemple, tourner à droite ou à gauche au lieu de continuer tout droit) a été calculé. Le tableau 1 montre ces données, en fonction du sexe des participants, du type d'aide utilisé avant la navigation et du type d'itinéraire parcouru. Le tableau 2 montre les écarts-type et les intervalles de confiance (IC) à 95%.

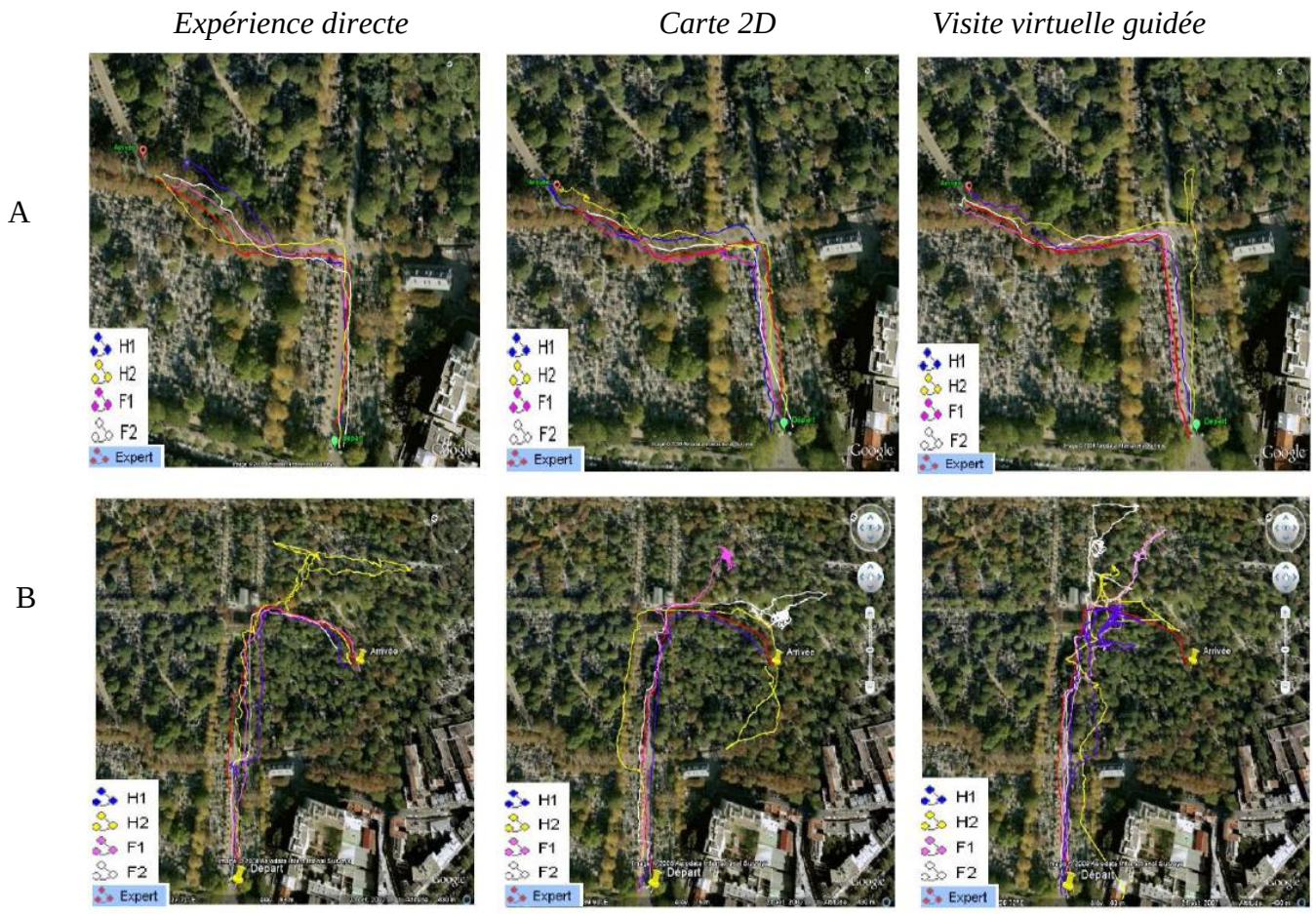


***Figure 12* : Les tracés GPS individuels des parcours effectués par les participants des différents groupes.** *Les tracés pour différentes conditions de familiarisation, sur parcours simple A (panneau supérieur) et sur parcours complexe B (anneau inférieur), sont représentés. A gauche, les images montrent les tracés de deux hommes (H1, H2) et deux femmes (F1, F2) qui ont eu une expérience directe au moyen d'une visite réelle guidée avant navigation. Les images du milieu montrent les tracés des participants qui ont eu carte 2D avant la navigation. A droite on voit les tracés des participants qui ont eu une visite virtuelle guidée au préalable. Les tracés des individus dits « experts » sont superposés en rouge pour comparaison.*

Pour les participants qui ont effectué le parcours simple, aucune différence systématique n'a été constatée entre les hommes et les femmes pour les différents types d'aide à la navigation (tableau 1). Les niveaux de réussite étaient de l'ordre de 100%, indiquant que tous les participants ont bien retrouvé leur chemin sur le parcours simple dans les différentes conditions (tableau 1).

***Tableau 1*: Les performances de navigation des participants ayant effectués les parcours simple et complexe** *(d'après Boumenir et al, 2010), représentées ici en fonction du sexe et des conditions de familiarisation avec le parcours avant navigation (N=24, deux hommes et deux femmes par condition).*

Variable	2D Map		Direct Experience		Virtual Tour	
	Men	Women	Men	Women	Men	Women
	(34, 35 yr.)	(30, 25 yr.)	(26, 29 yr.)	(32, 50 yr.)	(28, 48 yr.)	(22, 33 yr.)
Simple route						
Wrong turns	0	0.5	0	0	0	0.5
Time from departure, sec.	210	251	192	195	280	188
Speed, kph	5.9	3.6	4.8	3.5	3.9	5.3
Distance travelled, m	344	236	246	247	293	275
Success rate, %	100	100	100	100	100	100
	(24, 29 yr.)	(30, 34 yr.)	(37, 45 yr.)	(24, 38 yr.)	(23, 29 yr.)	(29, 33 yr.)
Complex route						
Wrong turns	1	9	2	0	10	10
Time from departure, sec.	573	1,288	637	351	1,276	1,006
Speed, kph	3.9	3.1	4.9	4.6	3.3	4.0
Distance travelled, m	634	1,121	900	445	1,207	1,050
Success rate, %	50	50	100	100	0	0

***Tableau 2* : Statistiques descriptives (d'après Boumenir et al, 2010) relatives aux performances de navigation.** *Les moyennes (m) écarts-type (sd) et intervalles de confiance à 95% sont représentés ici en fonction du type de parcours (simple ou complexe) et de la condition de familiarisation préalable avec le parcours (plan 2D, expérience directe ou visite virtuelle.*

Variable	2D Map			Direct Experience			Virtual Tour		
	M	*SD*	95%*CI*	*M*	*SD*	95%*CI*	*M*	*SD*	95%*CI*
Simple route									
Wrong turns	0.25	0.5	0.79	0	0	0	0.25	0.5	0.79
Time from departure, sec.	230.3	60.4	96.2	193.7	35.9	57.1	233.8	69.3	110
Speed, kph	4.7	1.52	2.42	4.2	1.17	1.86	4.6	0.92	1.46
Distance travelled, m	286.6	66.2	105	246.3	9.3	14.8	285	26.3	41.8
Complex route									
Wrong turns	5	2.5	9.8	1.25	2.5	3.9	10	4.4	6.9
Time from departure, sec.	930	366	642	493.7	262	416	1,141	170	270
Speed, kph	3.5	0.50	0.80	4.8	0.62	0.99	3.7	0.66	1.06
Distance travelled, m	877	344	547	673	420	668	1,129	259	412

Les données enregistrées pour les participants ayant effectués le parcours simple ne sont pas significativement différentes des données des trois experts. Pour ce qui concerne le parcours complexe, des temps remarquablement plus longs ainsi que des distances parcourues plus grandes ont été enregistrés pour les femmes dans la condition de familiarisation au moyen du plan 2D (tableau 1). Dans les autres conditions, avec l'expérience directe par visite réelle guidée et avec visite virtuelle guidée, les temps et les distances étaient plus importants pour les hommes (tableau 1). Des différences significatives au niveau des paramètres de performance ont été observées entre les différentes conditions de familiarisation. Les meilleures performances sur le parcours complexe, avec le plus petits nombre d'erreurs, les temps les plus courts, les plus courtes distances parcourues et les vitesses de déplacement les plus rapides, ont été notées après l'expérience directe au moyen d'une visite réelle guidée (tableaux 1 et 2). Les niveaux de réussite dans cette condition étaient de 100%, indiquant que tous les participants ont réussi à retrouver leur chemin après une visite réelle guidée avant navigation. Ces performances se rapprochent fortement de celles des trois « experts » qui étaient familiers avec le parcours (tableau 3). Les moins bonnes performances, avec le plus grand nombre d'erreurs, des temps et des distances beaucoup plus importants ainsi qu'un niveau de réussite quasi nul ont été enregistrées dans la condition avec visite virtuelle guidée sur le parcours complexe avant navigation (voir tableaux 1 et 2). Les participants de la condition plan 2D ont eu des performances supérieures à ceux de la condition visite virtuelle guidée, mais inférieures à ceux de la condition expérience directe au moyen d'une visite réelle guidée (tableaux 1 et 2), avec 50% de réussite en moyenne, indiquant que la moitié des participants dans cette condition n'a pas retrouvé le point d'arrivée du parcours complexe après avoir exploré un plan 2D.

Analyses statistiques

Des analyses statistiques ont été effectuées par la suite et les résultats de ces traitements sont résumés dans le tableau 4 (voir aussi les listings ANOVA en annexe. Les analyses de la variance (ANOVA) sur base d'un plan d'analyse 2x3 comparant les moyennes (N=6) des trois conditions de familiarisation pour les deux types de parcours signalent des effets statistiquement significatifs du type d'aide à la navigation sur le nombre d'erreurs de navigation (voir tableau 4 pour les valeurs des *F* et les limites de probabilité).

***Tableau 3* : Statistiques descriptives relatives aux données des trois experts pour les parcours simple et complexe (d'après Boumenir et al, 2010).**

Variable	Experts ($n=3$)		
	M	*SD*	95%*CI*
Simple route			
Wrong turns	0	0	0
Time from departure, sec.	172	34.7	86
Speed, kph	5.8	0.66	1.65
Distance travelled, m	254	12.2	30.2
Complex route			
Wrong turns	0	0	0
Time from departure, sec.	379	94.6	234
Speed, kph	4.6	1.11	2.76
Distance travelled, m	461	18.2	45.1

***Tableau 4* : Résultats des analyses de la variance (F de Snédecor) et de tests *post hoc* (t de Student) pour les conditions de navigation en parcours complexe (d'après Boumenir et al, 2010)**. *Les variables dépendantes sont le nombre de mauvais tournants, le temps de parcours effectué et a vitesse moyenne de déplacement.*

Analysis	*df*	Number of Wrong Turns			Time From Departure, sec.			Average Speed, kph		
		F	*p*	η^2	*F*	*p*	η^2	*F*	*p*	η^2
ANOVA										
2 (Route) × 3 (Condition)	1,5	11.86	.0002	0.36				1.28	.31	0.03
1 (Simple) × 3 (Condition)	1,2	0.49	.62	0.10	0.61	.56	0.11	0.19	.83	0.04
1 (Complex) × 3 (Condition)	1,2	7.26	.01	0.45	4.16	.05	0.47	5.495	.03	0.54
Post hoc t tests		*t*	*p*	*d*	*t*	*p*	*d*	*t*	*p*	*d*
Comparison										
Direct experience vs 2D map	1,6	1.63	.15	3.75	1.90	.11	437	3.08	.02	1.3
Direct experience vs virtual tour	1,6	3.80	.009	8.75	2.83	.03	647	2.61	.04	1.1
2D map vs virtual tour	1,6	2.17	.07	5.00	0.92	.39	211	0.47	.65	0.2

Une ANOVA sur base d'un plan d'analyse 1x3 comparant les moyennes (N=3) des trois conditions de familiarisation en parcours complexe uniquement signale des effets statistiquement significatifs du types de familiarisation ou d'aide sur le nombre d'erreurs de navigation, le temps (effet faiblement significatif) et la vitesse moyenne de déplacement (voir tableau 4 pour les valeurs du *F* et les limites de probabilité).

Des comparaisons *à postériori* (tests de Student) entre sous-groupes de la condition parcours complexe ont montré des effets statiquement significatifs sur le nombre d'erreurs de navigation, le temps mis et la vitesse moyenne de déplacement entre les groupes « expérience directe au moyen d'une visite guidée réelle » et « visite guidée virtuelle » (voir tableau 4 pour les valeurs du *t* et les limites de probabilité). La comparaison entre les groupes « expérience directe au moyen d'une visite réelle guidée » et « plan 2D » pour le cas du parcours complexe a signalé une différence statistiquement significative entre les vitesses moyennes de déplacement (tableau 4).

Stratégies et préférences signalées

Tous les participants ont remplis un questionnaire immédiatement après la fin de l'expérience de navigation. Ceci nous a permis d'avoir une idée des stratégies utilisées lors des parcours après les différents types de familiarisation avec le parcours. Les participants des groupes ayant eu une expérience direct par visite réelle guidée ou une visite virtuelle guidée du parcours complexe avant la navigation ont signalé avoir mémorisé des repères spécifiques tels que les gravures sur les tombes, les panneaux de signalisations, ou la chapelle. Les participants du groupe « plan 2D » ont signalé avoir mémorisé les différents changements d'orientation sur le parcours, comme « tourner à gauche », « à droite », ou « continuer tout droit » et leur succession. Le tableau 5 ci-dessous résume les stratégies qui ont été répertoriées.

***Tableau 5* : Résumé des stratégies signalées par les sujets après la navigation en parcours simple et complexe en fonction des différents types de familiarisation avec les parcours** *: expérience directe au moyen d'une visite réelle guidée, plan 2D et visite virtuelle guidée.*

Stratégies signalées	Expérience directe	Plan 2D	Visite virtuelle guidée
Parcours simple	J'ai suivi les plaquettes chapelle. - Lecture des noms sur les tombes (croquis dessiné) - J'ai suivi les plaquettes chapelle, plus repérage des tombes - Suivre la signalétique	- Intersection - Tombes et monuments - Mémorisation des embranchements et le nombre de croisement - Mémorisation du plan, des croisements et de l'arrivée en forme de fourche	- Souvenir du parcours sur PC - Route, tombes, monuments - Disposition de certaines tombes, mémorisation du plan interactif - Suivre allée avec les deux bandes de gazon, puis je devais aller à gauche
Parcours complexe	- Recherche des repères - Repère visuel - Feeling et les tombes - Panneaux, bâtiment, chapelle	- Analyse de la forme générale, mémorisation de 1 : allée jusqu'à la chapelle, 2 : changer de direction après la chapelle - Suivre les grands chemins le plus longtemps possible - Déduction du point d'arrivée - 1 : la chapelle, 2 : forme courbe du sentier de la deuxième portion de l'itinéraire	- Classification des repères entre virtuel et réel - Mémorisation des points de repère, impossibilité de les articuler dans le réel - Mémorisation insuffisante des points de repère, sans le contexte - Mémorisation d'endroits auxquels j'ai associé des directions

IV.1.3. DISCUSSION

Cette étude sur le terrain du Père Lachaise nous a permis de faire ressortir des particularités importantes de la navigation spontanée en milieu complexe non-familier en apportant des clarifications sur le poids de certains facteurs de réussite, ou d'échec. Dans la vie quotidienne, nous dépendons souvent d'informations ou d'aides provenant de sources indirects. Ces dernières ne sont pas équivalentes. Nos résultats ici montrent une assez bonne efficacité relative d'un plan 2D et une inefficacité flagrante d'une visite virtuelle du parcours complexe pour retrouver ce parcours ultérieurement. Notre étude confirme l'effet supérieur de l'expérience directe guidée dans la construction d'une représentation mentale d'un environnement réel complexe. Notre étude confirme qu'une expérience directe au moyen d'une visite guidée réelle au préalable est le moyen le plus efficace de familiarisation avec un parcours complexe.

Le caractère visuel « réaliste » de l'environnement virtuel en 3D projeté exploité dans le cadre de cette étude ne semblait rien apporter à la navigation sur parcours complexe. En toute occurrence, ce mode de familiarisation au parcours n'a pas fourni aux sujets les connaissances spatiales nécessaires pour naviguer de manière efficace dans l'environnement réel. Nous pensons que ceci s'explique par le fait que des informations relatives à l'échelle, aux directions, et aux distances relatives entre routes et repères manquaient aux représentations virtuelles. Ceci expliquerait également pourquoi les plans 2D se sont avérés significativement plus efficaces. Ces derniers rendaient les informations géométriques essentielles disponibles et permettaient d'extraire une bonne compréhension de la configuration globale du parcours complexe. Cette dernière est essentielle pour bien se représenter des lieux ainsi que les étapes successives d'un parcours. La représentation interne de la configuration globale d'un espace complexe résulte de processus perceptifs et mnésiques qui déterminent la cartographie cognitive chez l'homme (Golledge, 1999).

Les informations véhiculées par les repères symboliques jouent également un rôle dans cette « cartographie cognitive ». Elles peuvent déclencher des processus associatifs dans la mémoire à long terme. Des études d'imagerie fonctionnelle par résonance magnétique (*fIRM*) ont démontré que la structure qui assure l'encodage de repères spatiaux dans la mémoire à long terme chez l'homme, au niveau du gyrus parahippocampique, est activée de manière différentielle chez les navigateurs particulièrement expérimentés et compétents d'une part et peu compétents d'autre part

(Janzen *et al*, 2007). Ce résultat a tendance à suggérer que l'apprentissage des repères est un aspect crucial pour devenir un très bon navigateur et pourrait être particulièrement important lorsque la géométrie ou la disposition spatiale d'un nouvel environnement est trop complexe pour être exploitée directement, ce qui était bien le cas du parcours complexe dans notre étude. Une expérience directe avec les lieux permet l'accès direct à la connaissance de repères, ce qui expliquerait alors les bonnes performances sur le parcours complexe après la visite réelle guidée.

La visualisation panoramique étape par étape des séquences de représentations virtuelles du parcours complexe dans cette étude n'était d'aucune utilité pour les sujets en dépit du fait qu'elle donnait accès aux mêmes séquences de repères locaux qu'une expérience directe avec le parcours. Nous sommes amenés à conclure que les participants étaient incapables d'exploiter l'information relative aux repères et de les utiliser pour former des représentations spatiales valides du parcours complexe. Ceci est sans doute expliqué par le fait qu'une évaluation des distances relatives entre les tournants critiques et les repères était impossible sur la base d'un outil virtuel. Un autre inconvénient potentiel de l'outil particulier de navigation virtuelle de cette étude peut être relié au fait que les directions soient données par des flèches toujours pointées vers l'avant sur l'écran. Ceci implique que les participants naviguant de mémoire avaient sans doute encodés des représentations strictement linéaires de l'espace en question, alors que l'environnement réel du parcours complexe avait une géométrie complexe requérant plusieurs changements de direction.

L'interprétation de nos résultats met en lumière d'autres connaissances relatives aux stratégies de navigation, dont certaines ont été identifiées dans des études précédentes (cf O'Keefe & Nadel, 1978; Russell & Ward, 1982; Passini, 1984; Lawton, 1994; Schlender, Peters &Wienhöfer, 2000). La stratégie la plus utilisée dans la navigation de mémoire a été décrite en termes d'opérations de séquençage des routes (cf Denis, 1997), où les instructions encodées dans un certain ordre permettent à l'individu de se déplacer d'un point donné à un autre jusqu'à atteindre la destination. Ce type de stratégie exploite les repères d'un itinéraire et exploites les directions et actions successives telles que « tourner à droite », « à gauche » ou « continuer tout droit » jusqu'au prochain repère. Etre capable d'estimer la distance entre ces repères donnés est donc important et n'importe quel environnement virtuel qui donne des informations erronées ou imprécises sur ces distances relatives risque de conduire en échec un navigateur qui se fie exclusivement à l'outil. Les réponses aux questionnaires dans notre étude suggèrent

que les participants tâchaient, en effet, d'utiliser des repères pour retrouver leur chemin de mémoire dans toutes les conditions sauf celle de l'exploration préalable d'un plan 2D.

La possibilité que des différences significatives entre l'homme et la femme influenceraient la résolution de problèmes relatifs à l'espace a été sujet à débat dans plusieurs études (Allen & Hogeland, 1978; Prestopnik & Roskos-Ewoldsen, 2000). Bien que la différence entre les sexes représente une voie intéressante à exploiter, cette question ne pouvait être traitée de manière satisfaisante dans notre expérience à cause d'un relativement faible effectif de sujets. On a veillé à ce que le nombre d'hommes et de femmes soit équivalent dans toutes les conditions pour éviter un biais. Néanmoins certains des résultats montrés ici suggèrent, en effet, des différences entre les sexes dans certaines conditions. Par exemple, les deux femmes qui ont exploré un plan 2D avant la navigation sur le parcours complexe ont mis un temps 2 fois plus long et ont parcouru des distances plus importantes que les deux hommes dans la même condition. Cependant, des conclusions statistiquement valides ne peuvent être tirées. La question si une différence entre l'homme et la femme existe par rapport aux habilités spatiales représente une controverse (cf Voyer, Voyer & Bryden, 1995) et les différences entre les sexes n'ont pas été observées d'une manière systématique dans des tâches spatiales. Certains auteurs ont trouvé des performances supérieures chez les hommes (cf. Allen & Hogeland, 1978; McGee, 1979; Linn & Petersen, 1985). D'autres facteurs qui pourraient contribuer à l'explication de tels résultats ont été retrouvés, entre autres dans les études menées par Lawton (1994, 1996) ainsi que Prestopnik & Roskos-Ewoldsen (2000). Ces auteurs ont argumenté que les performances qui favorisaient beaucoup plus les hommes dans une tâche de navigation spatiale étaient dues aux stratégies utilisées. On a notamment constaté que les hommes préfèrent les stratégies relatives à une connaissance de la géométrie globale de l'espace (« *survey knowledge* »), en se fiant surtout aux directions cardinales (nord, sud, est et ouest). Les femmes, par contre, semblent préférer se fier aux représentations de la disposition spatiale des repères et de configurations locales et globales de routes *(« landmark knowledge »* et *« route knowledge »*).

----------EXPERIENCE 2

Expérience en laboratoire et sur le terrain à Paris utilisant « Google Street View »

Effets d'une brève exploration de l'outil virtuel sur les stratégies de navigation sur écran d'ordinateur et en milieu urbain réel

La navigation d'un point de départ vers une destination donnée à travers des espaces représentés virtuellement sur un écran d'ordinateur, est une tâche complexe, courante dans la société contemporaine. Les outils de navigation sur ordinateur, tels que Google Street View et d'autres systèmes de navigation virtuelle, comme par exemple « *Virtual Field Trip* », développé par la NASA, sont utilisés par une multitude d'individus, professionnels et amateurs. Ceci a donné lieu à l'émergence de nouvelles stratégies mentales dans la « cartographie cognitive » des environnements physiques.

Dans la deuxième expérience de cette thèse, on s'est intéressé à l'étude des performances de navigation, en laboratoire au moyen d'un environnement virtuel et dans le milieu urbain réel à Paris. Un grand nombre de personnes aujourd'hui préparent leurs itinéraires sur la base d'outils de visualisation virtuelle disponibles sur le web, comme « *Map*y » ou « *Google Street View* » qui est un outil de réalité augmentée qui permet la navigation virtuelle en milieu urbain. L'un des outils qui représentent un environnement urbain réel d'une façon relativement véridique et fiable semble être *Google Street View*. Dans cette étude, la capacité de la mémoire de travail humaine a été mise à l'épreuve au moyen d'une tâche de navigation, de complexité variable, sur la base de cet outil. Ainsi, nous avons tenté d'estimer la quantité relative d'informations visuelles complexes que l'homme ou la femme peut encoder en mémoire de travail après une brève exploration de cet outil d'aide à la navigation. Dans cette perspective, nous avons demandé aux sujets de retrouver un itinéraire préalablement exploré au moyen de l'outil en un seul essai *(« single trial learning »*), les conduisant d'un point de départ à un emplacement cible, dans le milieu virtuel même et dans le milieu urbain réel dans un des quartiers du 5ième arrondissement de Paris.

Les capacités, supposées assez limitées, de la mémoire de travail influencent nos représentations internes d'environnements physiques (Tolman, 1948; Denis et Loomis, 2007; Meilinger *et al*, 2008). Dans le modèle de la mémoire de travail le plus fréquemment évoqué, celui de Baddeley (cf Baddeley, 2003), le traitement sélectif de l'information visuelle et spatiale se fait par le biais du sous-système du calepin visuel-spatial, qui renvoie les entrées filtrées à l'administrateur central de la mémoire à long terme, puis en reçoit des informations en retour. Ceci se réalise au moyen d'interactions avec le filtre de mémoire épisodique et avec la boucle articulatoire (voir le chapitre relatif à la mémoire de travail dans l'introduction générale). Ainsi les étapes critiques d'un itinéraire comme, par exemple, « tourner d'abord à droite, puis à gauche et ensuite

tout droit » sont maintenues en mémoire de travail à l'aide de stratégies de répétition (*« rehearsal »*) implicite et explicite d'informations et d'actions. D'un point de vue fonctionnel, la prise de décisions adéquates qui permet à une personne de retrouver son chemin aussi rapidement que possible sans se perdre est liée aux caractéristiques physiques d'un environnement d'une part, et aux connaissances et représentations individuelles « cartographies cognitives » du navigateur d'autre part. Ces dernières rappellent les travaux de Tolman (1948) sur les cartes cognitives chez le rat et l'homme.

Les cartes cognitives ont été liées à des structures spécifiques de la mémoire (O'Keefe et Nadel, 1978 ; Janzen & Janzen, van Turennout, 2007) et semblent être structurées de manière hiérarchique à travers l'apprentissage spatial, l'assemblage de différentes caractéristiques de l'espace et de leurs relations spatiales complexes, en différents niveaux de représentation. L'utilisation efficace de repères visuels semble être un aspect critique de la cartographie cognitive. Elle distinguerait les bons navigateurs des mauvais et reflèterait une capacité qui serait encodée dans des structures fonctionnelles bien identifiées (l'hippocampe et ses connections) du cerveau humain (Janzen *et al*, 2007). Une expérience directe avec un environnement permet l'intégration multi-sensorielle des informations spatiales (Berthoz & Viaud-Delmon, 1999) et conduit à la formation de représentations égocentriques ou allocentriques de l'espace, qui sont importantes dans la navigation en milieu réel et nécessitent des entrées perceptives sur l'espace et les lieux, à l'échelle appropriée. L'efficacité d'une expérience directe, par contre, pourrait varier considérablement avec les paramètres du monde réel tels que, la densité de personnes et/ou de voitures dans la rue, ou encore les conditions d'éclairage.

Des informations abstraites et permanentes sur un environnement donné, telles que la disposition spatiale des routes et la géométrie de leur configuration, sont communiquées aisément à travers un plan visuel en 2D. Naviguer sur la base d'un plan implique des transformations psychologiques, qui consistent à relier une représentation simplifiée à une réalité beaucoup plus complexe (Newcombe & Huttenlocher, 2000; Liben, 2001). Bien que des travaux récents aient suggérés que les navigateurs peuvent bénéficier de façon équivalente d'un plan visuel 2D et d'une expérience directe (Ishikawa et *al*, 2008), d'autres travaux antérieurs avaient montrés que la capacité des individus à exploiter un plan 2D pour la navigation variait considérablement (cf Rovine & Weisman, 1989). De telles différences interindividuelles pourraient bien refléter des interactions complexes entre l'expérience particulière d'une personne et les limites de

capacité de la mémoire de travail. D'autres auteurs ont pensé que des différences entre hommes et femmes et leurs niveaux d'anxiété relatifs par rapport à une problématique spatiale seraient la source prépondérante de différences interindividuelles dans les tâches de mémoire spatiale.

Parmi les facteurs qui pourraient contribuer à expliquer les différences entre individus dans les tâches spatiales a été évoqué celui des préférences stratégiques (Lawton, 1994), où l'homme aurait tendance à préférer des stratégies de routes basées sur la configuration globale des lieux et se fiant essentiellement aux directions cardinales (nord, sud, est et ouest). La femme, par contre, aurait tendance à se fier à la configuration locale et des routes et aux repères les plus saillants (Prestopnik & Roskos-Ewoldsen, 2000). Il ne fait aucun doute que les femmes peuvent devenir d'excellents navigateurs et il serait donc important d'avoir une meilleure compréhension de l'origine des différences présumées dans les stratégies spatiales entre les hommes et les femmes. L'anxiété ou le stress psychologique dû à l'incertitude spatiale, affectant beaucoup plus les femmes que les hommes, a été considérée comme une explication psychologique possible des différences entre les sexes dans la résolution des problèmes liés à l'espace (cf. McGee, 1979 ; Lawton, 1994). Cependant d'autres recherches sont nécessaires pour déterminer dans quelle mesure et pourquoi les femmes pourraient être plus stressées ou anxieuses que les hommes dans de telles situations. La complexité de la tâche ainsi que l'expérience individuelle sont des variables importantes qui ont besoin d'être testées dans cette optique. Aussi, les stratégies individuelles, quelles soient spécifiques au sexe ou non, sont susceptibles de dépendre non seulement de l'expérience ou des compétences propre, mais aussi du type d'environnement avec lequel le navigateur est confronté. Les résultats issus de la première expérience de cette thèse, publiés antérieurement (Boumenir *et al*, 2010) suggèrent que les femmes pourraient avoir plus de difficultés que les hommes à naviguer de mémoire après un apprentissage sur plan 2D, surtout lorsque la géométrie des parcours est complexe et la végétation qui l'entoure particulièrement dense.

Le type de représentation de l'environnement pourrait aussi être un facteur discriminant. Les représentations virtuelles des environnements du monde réel génèrent des informations spatiales basées exclusivement sur des entrées perceptives de nature visuelle (Ohmi, 1996), que l'utilisateur exploite pour mettre l'espace virtuel à une

échelle qui lui sera propre. Cependant, la différence la plus importante entre les environnements du monde réel et leurs représentations virtuelles est la différence d'échelle. De plus, les images virtuelles qui sont uniquement de nature visuelle restreignent le champ perceptif privant ainsi l'utilisateur des entrées multi-sensorielles qui sont importantes pour la navigation en milieu réel (Ohmi, 1996 ; Berthoz et Viaud-Delmon, 1999). Néanmoins, certaines connaissances spatiales acquises au moyen de représentations virtuelles semblent bien se transférer à une navigation ultérieure dans le monde réel (cf Athur et *al*, 1997 ; Witmer et *al*, 1996), quoique, la navigation à travers des espaces tels que les villes virtuelles représente des contraintes particulières. La notion de complexité y est certainement simplifiée et réduite aux informations visuelles (cf Meilinger et *al*, 2008). La quantité et la qualité relative des informations spatiales rendues disponibles visuellement à un navigateur sur un écran d'ordinateur détermineront ainsi la complexité globale du problème posé.

IV.2.1. MATERIELS ET METHODES

Nous avons dans un premier temps étudié les paramètres critiques de performances de navigation de mémoire à travers les représentations virtuelles de l'environnement complexe urbain, visualisé au moyen de l'outil GSV en laboratoire. L'exposition préalable des individus aux itinéraires non familiers a été réalisée soit au moyen d'une expérience GSV unique, qui consistait en une seule visite virtuelle du parcours, soit au moyen d'une exposition indirecte à un plan 2D du parcours. Des hommes et des femmes ont été testés d'abord dans une tâche de navigation simple, suivie d'une autre plus complexe, à travers certaines rues du 5ième arrondissement à Paris. En phase de test, les sujets devaient retrouver de mémoire l'itinéraire qui leur avait été montré au cours de la phase de familiarisation en virtuel ou en 2D, les menant d'un point de départ jusqu'à un point d'arrivée.

Les représentations mentales des parcours et les stratégies utilisées pour se repérer et retrouver les chemins ont été externalisés au moyen de dessins et de questionnaires. On a demandé, dans un premier temps, à tous les sujets de dessiner de mémoire les parcours après la phase de familiarisation (plan visuel 2D ou visite virtuelle GSV). Dans un deuxième temps, ils devaient répondre à un questionnaire après chaque phase expérimentale. Ces questionnaires nous permettaient de nous faire une idée des stratégies employées pour naviguer au moyen de GSV. De plus, pour tester leur capacité à reconnaître des repères particuliers après chaque phase expérimentale (familiarisation et test), nous avons demandé aux participants de sélectionner des images de repères qu'ils avaient identifiés au cours des tâches et de les placer ensuite sur un plan papier 2D d'un parcours donné.

Dans une autre série expérimentale sur le terrain à Paris, nous avons étudié la navigation de mémoire sur les mêmes itinéraires, mais cette fois-ci dans le milieu urbain réel. Les conditions de familiarisation avec les itinéraires étaient les mêmes, c'est-à-dire un plan visuel 2D, ou une visite virtuelle unique du parcours en mode GSV avant la phase test, où les sujets devaient retrouver le chemin de mémoire dans le réel.

IV.2.1.1. Navigation de mémoire dans l'environnement virtuel GSV

Participants

52 volontaires, dont 27 hommes et 25 femmes, ont acceptés de participer à cette étude. Leur âge était compris entre 23 et 63 ans et ils ont été recrutés sur la base d'un appel à volontaires, posté sur le serveur web de notre laboratoire. Dans la population d'étude choisie, on retrouve des professionnels et des étudiants. Une des conditions de participation était que le participant soit à l'aise dans l'utilisation d'un ordinateur, mais n'ait eu aucune expérience avec l'outil *Google Street View*. De plus, aucun des participants ne devait être familier avec les rues du 5ième arrondissement à Paris.

Outils et mesures

L'expérience en laboratoire était entièrement pilotée par un ordinateur de la marque DELL, équipé d'un écran couleur à 19 pouces et d'une souris pour la navigation. Le site web de l'expérience a été crée en utilisant un logiciel appelé *CMS*, qui est un système de gestion de contenu. L'application « *Joomla 1.0.15* » assurait la gestion de toute une session expérimentale individuelle en ligne, allant des instructions données au participant jusqu'à l'enregistrement des paramètres étudiés durant la navigation dans GSV. Les niveaux subjectifs de stress ainsi que les stratégies employées «étaient sondés au moyen questionnaires. Les fréquences cardiaques individuelles ont été enregistrées en cours des essais au moyen de « *Polar Pro Trainer 5* », un dispositif utilisé par des sportifs pour mesurer l'effort. L'ordinateur permettait l'accès direct à GSV au moment voulu dans une session. Il s'agit là d'un outil du web de plus en plus populaire, permettant aux utilisateurs de naviguer en ligne à travers des représentations virtuelles des rues d'une majorité des grandes villes. Les parcours simple et complexe choisis pour cette étude étaient localisés dans le 5ème arrondissement de Paris (voir la Figure 13 pour une illustration).

***Figure 13*: Représentation virtuelle de rues du 15ième arrondissement à Paris générée au moyen de Google Street View.**

Procédure

Tous les participants étaient équipés d'une ceinture thoracique, connectée au dispositif de mesure des fréquences cardiaques qui a été activé dès le début de l'expérience. Ils ont ensuite été placés en face de l'écran de l'ordinateur pour recevoir les instructions relatives à l'expérience, aux tâches à effectuer, et aux questionnaires. L'expérimentatrice était présente dans la pièce où se déroulait l'expérience, du début à la fin, pour aider et rassurer le participant et pour clarifier tout ce qui ne semblait pas avoir compris.

Après l'enregistrement et l'initialisation des outils de mesure, 27 des participants (14 hommes et 13 femmes) ont été familiarisés avec le parcours simple au moyen d'un plan 2D affiché sur l'écran. Sur ce plan étaient représentés les rues du quartier, le point de départ du parcours, un point intermédiaire et le point destination. Le participant avait pour instruction d'explorer le plan, et d'essayer de le mémoriser pendant environ deux minutes. Ensuite, il devait externaliser sa représentation mentale du trajet après familiarisation au moyen d'un dessin. La navigation de mémoire dans GSV (phase de test) était exécutée immédiatement après. La phase de test était arrêtée dès que le participant estimait avoir atteint le point de destination du parcours. Ensuite, un autre

questionnaire était rempli pour répertorier les stratégies employées et les niveaux de stress subjectifs pendant l'exécution de la tâche. Pour mesurer le stress subjectif, il a été demandé au participant d'estimer l'intensité du stress psychologique ressenti lors de la phase de test sur une échelle allant de -10 à +10. Il a été précisé que « -10 » représentait un niveau de relaxation maximale, « 0 » le niveau d'incertitude et « +10 » un niveau maximal de stress psychologique ou d'anxiété ressenti. De telles échelles sont régulièrement utilisées en ergonomie et en psychologie du travail pour estimer le niveau de stress des individus dans des tâches diverses. Ce questionnaire était suivi du test de reconnaissance visuelle et de placement des repères identifiés sur le parcours.

Le même protocole a été suivi, avec un même participant, mais cette fois-ci après familiarisation avec le parcours complexe au moyen d'une visite virtuelle unique en GSV. La visite virtuelle s'effectuait sans explications verbales et les participants ont suivi visuellement l'itinéraire parcouru par l'expérimentatrice.

Les 25 autres participants (13 hommes et 12 femmes) accomplissaient les tâches de « familiarisation » et de « test » en commençant avec une familiarisation par visite virtuelle en GSV du parcours simple avant le test sur ce parcours et en passant, par la suite, à une familiarisation par plan 2D avec le parcours complexe avant le test sur ce parcours.

Caractéristiques des itinéraires « simple » et « complexe »

Les parcours simple et complexe à travers certaines rues du 5ème arrondissement de Paris avaient été sélectionnés sur la base de paramètres physiques de la complexité relative, tels que la distance entre le point de départ et d'arrivée, le nombre d'intersections, le nombre de tournants critiques, et le nombre de repères disponibles (pour un résumé de ces critères, voir tableau 6).

Dans les représentations des parcours sous forme de plans 2D pour les phases de familiarisation de cette expérience, un seul emplacement intermédiaire de référence a été rajouté pour faciliter la mémorisation du parcours simple, deux emplacements intermédiaires pour faciliter l'encodage du parcours complexe (voir la Figure 14 ci-dessous).

***Tableau 6*: Résumé des caractéristiques physiques des itinéraires simple et complexe potentiellement critiques pour la navigation de mémoire.** *On y retrouve le nombre d'intersections (« intersections »), de tournants critiques (« critical turns ») et de repères aux intersections (« landmarks at intersections »).*

Itineraries	« simple »	« complex »
intersections	9	17
critical turns	3	6
landmarks at intersections	12	18

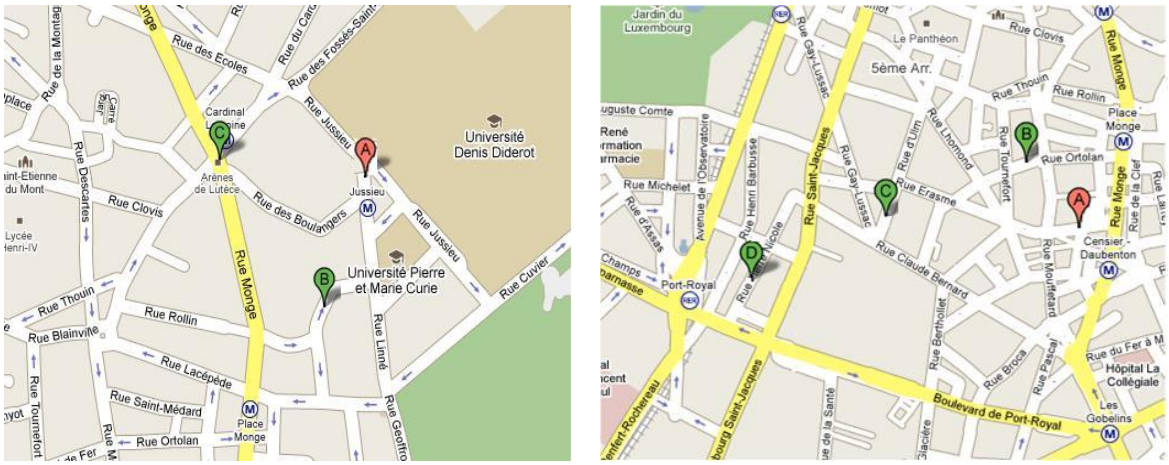


***Figure 14* : Représentations sous forme de plans 2D des rues du 5ième arrondissement à Paris.** *Dans les cas du parcours simple (à gauche), A représente la point de départ, B l'emplacement intermédiaire et C le point d'arrivée. Dans le cas du parcours complexe (à droite), A et D représentent respectivement le point de départ et le point d'arrivée, et B et C les emplacements intermédiaires par lesquelles les participants devaient obligatoirement passés.*

Questionnaire relatif aux stratégies

Tous les participants devaient répondre à des questionnaires après la phase de test. Dans ses questionnaires, on leur demande de classer, par ordre de priorité, les différents types de stratégies couramment utilisées pour mémoriser un trajet après familiarisation. Un total de cinq de ces stratégies type a été identifié auparavant dans la littérature consacrée:

- verbaliser les étapes (tourner à droite, puis à gauche,… par exemple)
- se rappeler les noms des rues
- compter les embranchements
- se rappeler l'emplacement des repères
- s'appuyer sur une image mentale du trajet

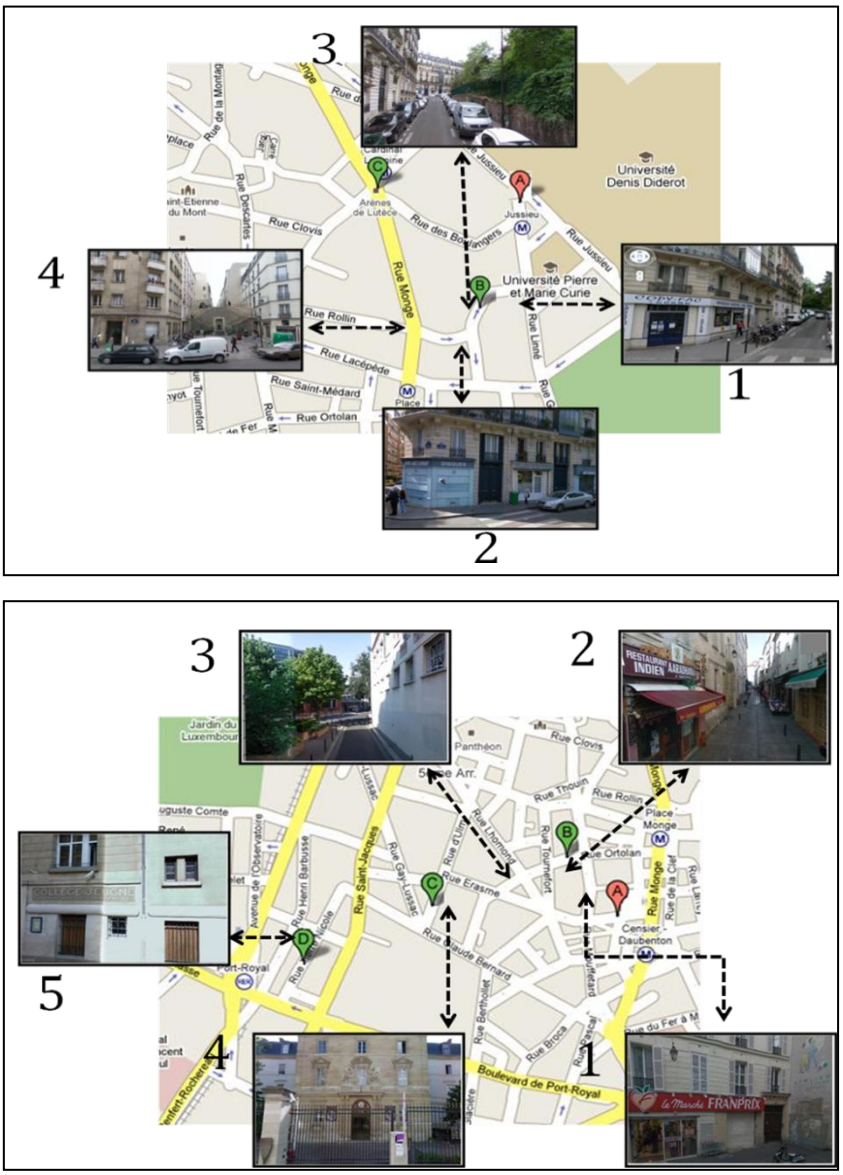
Test de reconnaissance de repères

Certaines images des alentours des parcours simple (6 images dont 4 se trouvaient le long du parcours même) et complexe (10 dont 5 se trouvaient le long du parcours même) ont été montré au participant après la phase de test en lui demandant d'identifier celles qui appartenaient aux parcours. Ensuite, le participant devait placer les images identifiées sur un plan papier 2D (voir Figure 15). Les images pour ce test ont été choisies en fonction de leur distance proximale ou distale, de leur position relative au parcours et sur la base de leur attractivité et/ou saillance. On retrouve certains magasins, un restaurant, un supermarché, une école, et autres points de repères.

IV.2.1.2. Navigation de mémoire dans l'environnement réel

Participants

Six volontaires, tous des hommes, ont participé à la deuxième partie de cette expérience, qui se déroulait dans l'environnement réel à Paris. Leur âge était compris entre 20 et 35 ans et ils ont été recrutés sur la base d'un appel à volontaires, posté à des personnes susceptibles de connaître un volontaire potentiel. Dans la population d'étude choisie, on retrouve essentiellement des étudiants. Les conditions de participation étaient identiques à celle identifiées pour les tests en environnement virtuel GSV en laboratoire, à savoir le participant devait être à l'aise dans l'utilisation d'un ordinateur, mais n'avoir aucune expérience avec l'outil *Google Street View* et ne pas être familier avec les rues du 5ième arrondissement à Paris.



<u>Figure 15</u> : Exemples d'images relatives aux points de repère potentiels sur les parcours simple (en haut) et complexe (en bas).

Outils et mesures

Pour cette partie de l'expérience, nous avons utilisé un ordinateur portable *DELL* avec un écran couleur à 15 pouces et une connexion WIFI libre du site universitaire de JUSSIEU (Université Paris 7). Cette fois-ci, les participants n'étaient pas équipés du dispositif de mesure de fréquences cardiaques, qui n'avaient d'ailleurs pas générés des observations différenciant les conditions de test en laboratoire. Pour tracer les déplacements dans le réel, nous avons utilisé un système mobile GPS similaire à celui qui a été utilisé dans l'expérience 1 de cette thèse. Les données GPX issues du GPS ont été exploitées au moyen du même logiciel (GPSed) afin de récupérer les temps de navigation en secondes, le nombre d'arrêts et celui des erreurs. L'expérimentatrice suivait les participants de loin pour les observer et pour arrêter le GPS à la fin de la phase test.

Procédure

L'expérience s'est déroulée dans l'environnement réel du 5ième arrondissement dans les rues de Paris, en respectant les étapes décrites plus haut, à l'exclusion de l'utilisation de l'outil de mesure des fréquences cardiaques et des mesures subjectives de stress. Les participants étaient accueillis dans une salle à l'université Paris 7 et installés en face de l'ordinateur portable. Chacun des participants a été familiarisé avec le parcours simple puis avec le parcours complexe, soit sur la base du plan 2D, soit sur la base d'une visite virtuelle en GSV. La phase de test consistait à retrouver le même chemin, de mémoire, dans l'environnement réel. Comme dans l'expérience en milieu virtuel au laboratoire, on a récupéré les dessins des parcours et les réponses relatives aux stratégies employées. Le test de reconnaissance visuelle/spatiale des images montrant certains repères potentiels sur les parcours simple et complexe était maintenu.

IV.2.2. RESULTATS

IV.2.2.1. Observations en milieu virtuel

Nous avons analysé les effets du type de parcours (« simple » ou « complexe »), des types d'aide à la familiarisation avant navigation de mémoire (« plan 2D » ou « expérience virtuelle directe ») ainsi que celui du facteur sexe, sur les temps de navigation du point de départ à l'arrivée et sur les taux de réussite, en prenant en compte les fréquences cardiaques et les niveaux de stress subjectif.

ANALYSES DESCRIPTIVES

Dans les tableaux 7 et 8 ci-dessous sont résumées les moyennes et les écarts-type relatifs aux données enregistrées pour les hommes et les femmes pour la navigation de mémoire en mode GSV.

***Tableau 7* : Statistiques descriptives des paramètres de performance et des niveaux de stress psychologique**, *obtenus à partir des données individuelles des hommes et des femmes ayant effectué le parcours simple après familiarisation au moyen d'un Plan 2D, suivi du parcours complexe après familiarisation au moyen d'une visite virtuelle unique en GSV.*

1st test simple itinerary after 2Dmap exposure	**men (N=14) age range: 25 to 63**	**women (N=13) age range: 23 to 55**
times (seconds)	mean: 240 std: 104 min: 120 max: 540	mean: 270 std: 124 min: 120 max: 530
success rates (percentage correct turns)	mean: 100% std: 0 min: 100% max: 100%	mean: 94% std: 14 min: 50% max: 100%
perceived stress (subjective scale: -10 to +10)	mean: +0.14 std: 6 min: -10 max: +10	mean: +2.3 std: 5.6 min: -8 max: +8
heart rates (number of beats per minute)	mean: 80 std: 12.8 min: 62 max: 113	mean: 79 std: 10.1 min: 67 max: 108
2nd test complex itinerary after direct exposure		
times (seconds)	mean: 315 std: 108 min: 181 max: 600	mean: 361 std: 120 min: 180 max: 540
success rates (percentage correct turns)	mean: 90% std: 26 min: 0% max: 100%	mean: 97% std: 6.3 min: 80% max: 100%
perceived stress (subjective scale: -10 to +10)	mean: 0 std: 5.8 min: -10 max: +6	mean: -5.5 std: 7.6 min: -10 max: +8
heart rates (number of beats per minute)	mean: 78 std: 13.3 min: 59 max: 112	mean: 77 std: 9.8 min: 66 max: 106

***Tableau 8* : Statistiques descriptives des paramètres de performance et des niveaux de stress psychologique**, *obtenus à partir des données individuelles des hommes et des femmes ayant effectué le parcours simple après visite virtuelle en GSV, suivi du parcours complexe après exploration d'un Plan 2D.*

1st test simple itinerary after direct exposure	**men (N=13) age range: 23 to 60**	**women (N=12) age range: 25 to 48**
time (seconds)	mean: 140 std: 74 min: 83 max: 360	mean: 172 std: 76 min: 95 max: 335
success rates (percentage correct turns)	mean: 100% std: 0 min: 100% max: 100%	mean: 100% std: 0 min: 100% max: 100%
perceived stress (subjective scale: -10 to +10)	mean: -3.1 std: 4.9 min: -8 max: +4	mean: -3.2 std: 6.5 min: -10 max: +10
heart rates (number of beats per minute)	mean: 79 std: 12.8 min: 57 max: 99	mean: 82 std: 12.8 min: 60 max: 101
2nd test complex itinerary after 2Dmap exposure		
time (seconds)	mean: 438 std: 174 min: 240 max: 910	mean: 584 std: 186 min: 300 max: 840
success rates (percentage correct turns)	mean: 69% std: 41 min: 0% max: 100%	mean: 53% std: 42.7 min: 0% max: 100%
perceived stress (subjective scale: -10 to +10)	mean: +1.5 std: 5.9 min: -8 max: +8	mean: +3.7 std: 5.7 min: -8 max: +10
heart rates (number of beats per minute)	mean: 75 std: 11.5 min: 54 max: 92	mean: 81 std: 14.2 min: 59 max: 100

Mesures de performance et niveaux subjectifs de stress pour le parcours complexe

La comparaison entre les données des deux conditions relatives au parcours complexe (tableaux 7 et 8) montre des temps plus courts après l'expérience directe par visite virtuelle qu'après exploration du plan 2D. Les niveaux de réussite des hommes et des femmes sont quasi équivalents dans la condition expérience directe par visite virtuelle. Dans la condition du plan 2D, cependant, les femmes ont moins bien réussi. Les fréquences cardiaques sont, comme dans le cas du parcours simple, peu variables selon les conditions. Les niveaux subjectifs de stress psychologique varient notablement, à savoir qu'après une exposition directe ou visite virtuelle, on note des niveaux de stress négatifs pour les femmes, et des niveaux aux alentours de zéro pour les hommes. Par contre, dans la condition du plan 2D, les niveaux de stress pour les femmes étaient deux fois plus élevés que chez les hommes. Dans le tableau 9, on

retrouve un résumé des niveaux de stress psychologique moyens et leurs écarts-type en fonction de l'âge et du sexe des individus. Ces données mettent en lumière que les niveaux de stress psychologique les plus élevés sont observés chez les femmes qui appartiennent à la tranche d'âge entre 40 et 63 ans. Les écarts-types signalent des variations interindividuelles considérables à l'intérieur de tous les groupes d'âges.

***Tableau 9* : Statistiques descriptives des estimations subjectives de stress psychologique des hommes et des femmes en fonction de l'âge dans les conditions du parcours complexe.**

Psychological stress ratings after complex itinerary task		
age range **20 – 27**	age range **28 to 39**	age range **40 to 63**
MEN		
mean: **+ 2.6** std: 5.2 min: - 8 max: + 8	mean: **+ 1.8** std: 5.8 min: - 10 max: + 6	mean: **- 3.4** std: 4.9 min: - 8 max: + 4
WOMEN		
mean: **+ 1.1** std: 7.4 min: - 10 max: + 10	mean: **+ 0.2** std: 6.8 min: - 10 max: + 8	mean: **+ 4.5** std: 8.5 min: - 8 max: + 10

Mesures de performance et niveaux subjectifs de stress pour le parcours simple

La comparaison entre les données des deux conditions relatives au parcours simple (tableaux 7 et 8) montre que les temps de navigation sont plus courts après l'expérience directe au moyen d'une visite virtuelle en GSV qu'après l'exploration du plan 2D. Les niveaux de réussite au parcours sont identiques dans ces deux conditions, avec 100% de tournants correctes pour les hommes. Les femmes ont produit un résultat légèrement inférieur à celui des hommes dans la condition Plan 2D, avec 94% de tournants corrects. Les fréquences cardiaques sont en moyenne entre 79 et 82 battements par minute et peu

variables entre les différentes conditions. Par contre, les niveaux de stress psychologique subjectif ressenti lors de l'exécution de la tâche de navigation varient considérablement selon les conditions. Après familiarisation au moyen d'une expérience directe par visite virtuelle GSV, on note des valeurs de stress négatives pour les deux sexes. Par contre, après exploration d'un plan 2D, on note des niveaux de stress positifs, et plus élevés pour les femmes.

Différences entre les conditions de parcours simple et complexe

Les temps mis pour naviguer du point de départ jusqu'à destination sont, ce qui va de soi, plus longs dans les conditions du parcours complexe, qui était deux fois plus long en termes de distances que le parcours simple. Les niveaux de réussite en termes de pourcentage de tournants corrects étaient généralement moins bons en parcours complexe et fonction du type de familiarisation ou d'exposition préalable (comparaisons entre les tableaux 7 et 8). Les effets du type de parcours ou d'itinéraire sur les niveaux subjectifs de stress dépendent du type de familiarisation ou exposition préalable. Les fréquences cardiaques n'étaient en général pas affectées par le type de parcours et varient très peu en fonction du type de familiarisation ou d'exposition préalable.

Performances et niveaux subjectifs de stress en fonction du type de familiarisation

Il convient de rappeler que le sujets étaient familiarisés avec, ou exposés à, un parcours donné au moyen de deux types d'aide, préalable à la navigation en phase de test : une exposition directe par visite virtuelle en GSV ou un plan 2D. Les temps de navigation dans la phase de test étaient plus courts après une familiarisation par exposition directe au moyen de la visite virtuelle en GSV. Dans les conditions du parcours simple, les temps les plus courts étaient ceux des hommes après expérience directe par visite virtuelle. Les temps les plus longs étaient ceux des femmes après exploration du plan 2D. Les mêmes résultats sont obtenus dans les conditions du parcours complexe (comparaison entre les tableaux 7 et 8). Les temps de navigation individuels des hommes et des femmes dans les deux conditions de parcours et en fonction du type de familiarisation sont répertoriés dans l'ordre croissant sous forme d'un graphique dans la Figure 16. La familiarisation avec le parcours complexe au

moyen du plan 2D n'était pas favorable aux femmes, qui montrent des niveaux de réussite plus bas et des taux de stress nettement supérieurs en comparaison avec la familiarisation au moyen d'une visite directe en GSV (comparaisons entre tableau 7 et 8).

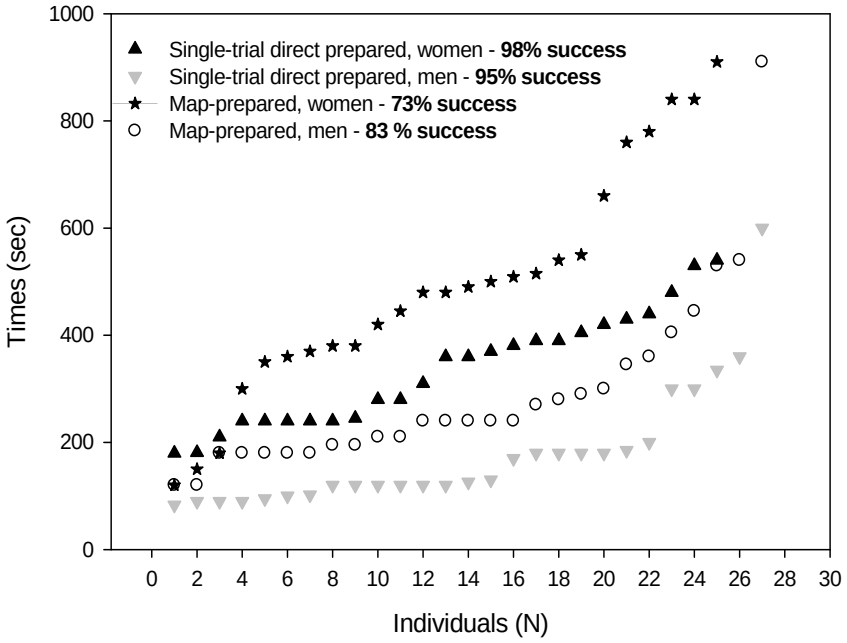


***Figure 16* : Temps de navigation en secondes des hommes et des femmes dans les deux conditions de familiarisation ou d'exposition préalable (plan 2D ou expérience directe par visite virtuelle GSV).** *Les taux de réussite moyens pour chaque condition sont indiqués dans la légende.*

ANALYSES STATISTIQUES

Des analyses statistiques (ANOVA) ont été réalisées afin d'évaluer si les résultats décrits plus haut étaient significatifs (tableaux 7 et 8 essentiellement). Ces analyses portent sur les effets du type de parcours, du type de familiarisation ou d'aide préalable et celui du facteur sexe sur les mesures de performance et les taux de subjectifs de stress.

Taux de réussite

Une ANOVA 2x2x2 relative aux effets du type de parcours, de familiarisation et du sexe sur les taux de réussite a révélé des effets significatifs du type de parcours ($F(1,2)=21.53$, $p<.001$), avec des taux de réussite plus élevés en parcours simple, et du type de familiarisation ($F(1,2)=14.45$, $p<.001$), avec des taux de réussite plus élevés après une familiarisation par visite virtuelle. Une interaction significative entre le type du parcours et le type de familiarisation ou exposition préalable ($F(1,3)=10.33$, $p<.01$) est signalée. Les comparaisons post-hoc 1x1 (t de Student par la méthode de Holm-Sidak) révèlent des effets significatifs indépendants du facteur sexe en situation de parcours simple ($t(1,2)= 3.20$, $p<.05$) et en situation du parcours complexe ($t(1,2)=3.35$, $p<.05$), avec des taux de réussite plus faibles pour les femmes dans les deux cas.

Temps de navigation

Une ANOVA 2x2 relative aux effets du type de familiarisation ou d'exposition et du sexe sur les temps de navigation en situation de parcours simple révèle un effet significatif du type de familiarisation ou d'exposition préalable sur les temps de navigation ($F(1,2)=13.29$, $p<.001$) avec des temps plus longs pour la condition du plan 2D. Appliquée au cas du parcours complexe, cette analyse révèle un effet significatif du type de familiarisation ou d'exposition ($F(1,2)=17.25$, $p<.001$), aussi avec des temps plus longs pour la condition du plan 2D, ainsi qu'un effet significatif du sexe ($F(1,2)=5.35$, $p<.05$), avec des temps de navigation plus long pour les femmes.

Taux subjectifs de stress psychologique

Une ANOVA 2x2x2 relative aux effets du type de parcours, du type de familiarisation ou d' exposition et de la variable sexe sur les taux de stress, estimés sur une échelle subjective entre -10 et +10, a révelé un effet significatif du type de familiarisation ou d'exposition au préalable ($F(1,2)=11.89$, $p<.001$) avec un taux de stress supérieur dans la condition du plan 2D. Des comparaisons post-hoc 1x1 (t de Student par la méthode de Holm-Sidak) ont révélé un effet significatif du facteur sexe en condition de familiarisation ou d'exposition préalable par visite virtuelle ($t(1,2)=3.39$, $p<.05$), avec des taux de stress plus bas pour les femmes.

IV.2.2.2. Observations en milieu réel

Etant donné l'effectif plus faible de sujets dans cette partie expérimentale réalisée dans le réel, les analyses se résument ici aux données individuelles relatives aux paramètres de performance (temps de navigation, erreurs de parcours, arrêts et réussite du parcours). Le tableau 10 ci-dessous résume ces données individuelles en fonction du type de parcours, du type de familiarisation et de l'âge des sujets (tous des hommes ici).

***Tableau 10* : Ce tableau résume les paramètres relatifs aux performances de navigation en milieu urbain réel à Paris en fonction de l'âge des sujets (tous des hommes) et de la complexité du trajet à retrouver (simple ou complexe).** *La partie supérieure (a) résume les performances après familiarisation avec le trajet au moyen d'un plan 2D, la partie inférieure (b) celles après familiarisation au moyen d'une seule visite virtuelle du trajet au moyen de l'outil Google Street View.*

a)

simple/2D map	**28 years**	**26 years**	**35 years**
time (min.)	7	9	4
wrong turns	0	3	1
Stops	0	1	0
found way again?	YES	NO	NO
complex/2D map	**21 years**	**20 years**	**21 years**
time (min.)	20	13	20
wrong turns	5	3	0
Stops	0	2	1
found way again?	NO	NO	YES

b)

simple/virtual	**21 years**	**20 years**	**21 years**
time (min.)	4	7	8
wrong turns	0	0	0
Stops	0	0	0
found way again?	YES	YES	YES
complex/virtual	**26 years**	**28 years**	**35 years**
time (min.)	14	18	11
wrong turns	0	1	0
Stops	1	2	3
found way again?	YES	YES	YES

Dans les deux conditions du parcours simple, les temps de navigation paraissent plus ou moins équivalents, cependant les arrêts ainsi que les erreurs de parcours sont plus nombreux dans la condition plan 2D. Tous les sujets familiarisés avec le parcours par visite virtuelle unique en GSV ont réussi leur parcours dans le réel (la Figure 17 ci-dessous montre les tracés GPS individuels dans les différentes conditions). Une seule personne sur trois a retrouvé son chemin après familiarisation au moyen d'un plan 2D en situation de parcours simple, et en situation de parcours complexe.

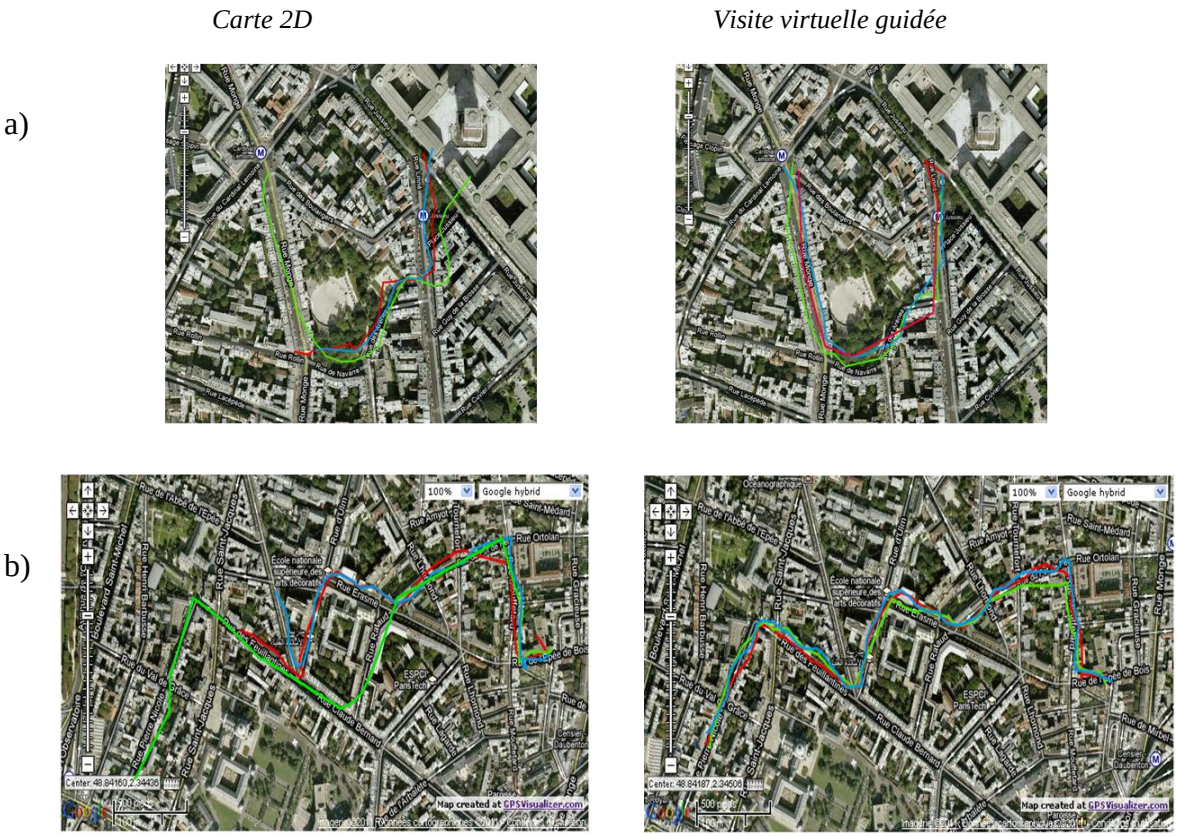


Figure 17 ***: Les tracés GPS individuels des parcours effectués par les participants des différents groupes.*** *Les tracés pour différentes conditions de familiarisation, sur parcours simple a (panneau supérieur) et sur parcours complexe b (panneau inférieur), sont représentés. A gauche, les images montrent les tracés de 3 hommes qui ont eu une eu carte 2D avant la navigation. A droite, les tracés des participants qui ont eu une visite virtuelle guidée au préalable.*

Représentations mentales des parcours et stratégies employées pour les deux observations

Les participants devaient dessiner de mémoire les parcours qu'ils venaient d'explorer sur la base d'un plan 2D ou d'une exposition directe en GSV, quelques dessins représentatifs sont présentés dans la Figure 18. Les résultats donnent lieu à deux groupes de dessins. Un groupe où les participants étaient entièrement capables de dessiner leurs représentations mentales des parcours, que ce soit sur la base d'un plan 2D ou celle d'une visite GSV. Dans ce groupe on observe deux types d'effets en condition plan 2D. D'une part, des dessins qui reproduisent à l'identique les parcours en termes de directions et de caractéristiques telles que la géométrie des rues, par exemple, et d'autre part des dessins qui reproduisent les mêmes caractéristiques, mais selon une autre disposition ou un autre point de vue que celui du plan 2D (phénomène de rotation mentale). Pour la condition expérience directe par visite virtuelle en GSV, les participants ont réalisé leurs dessins soit de façon égocentrique, c'est-à-dire par rapport à leur position physique relative au parcours GSV, soit de façon allocentrique, où le sens dans lequel est fait le dessin ne correspond pas à celui de la référence objet-sujet.

Dans le second groupe identifié ici, les sujets sont incapables de dessiner correctement les parcours. Les dessins sont ou bien incomplets, ou totalement confus et désorientés voir inexistants, pour les deux types de parcours et peu importe la condition de familiarisation. Dans les dessins incomplets, on remarque des oublis de segments de routes, au point de départ, ou au milieu du parcours. Les premiers bouts de chemin influencent beaucoup la réussite d'un parcours. Les personnes qui ne représentent pas dans leurs dessins le premier bout d'un parcours ont souvent fini par se désorienter ou se perdre. On a remarqué cependant que les oublis du milieu du parcours ne semblaient pas affecter leur réussite. On a observé aussi que certaines des personnes qui avaient fait des dessins totalement désorientés, ou n'étaient pas du tout parvenues à dessiner, réussissaient quand même leur parcours.

Dans la condition du plan 2D en parcours simple, 96% étaient capables de produire un dessin et d'atteindre le point d'arrivée, 3,7% étaient incapables de dessiner mais ont réussi quand même leur parcours. En milieu réel à Paris, les trois personnes en condition du plan 2D étaient capables de dessiner correctement les trajets, mais un seul d'entre eux n'a pas pu retrouver la destination finale en parcours simple. Dans la condition exposition directe par visite virtuelle GSV, 44% étaient capables de dessiner

leurs parcours et 56% incapables, mais tous ont pourtant réussi leur tâche de navigation GSV en laboratoire. De ceux qui devaient naviguer dans le réel, deux seulement ont pu dessiner correctement leur trajet, mais les trois ont réussi la tâche de navigation dans le réel à Paris.

Dans la condition du plan 2D en parcours complexe, 36 % étaient capables de dessiner leur parcours, 64% produisaient des dessins incomplets, désorientés ou aucun dessin. Leurs taux de réussite étaient de 20% et 28%, respectivement, lors de la tâche de navigation en GSV.

Dans la navigation dans le réel, tous les sujets qui ont été familiarisé au moyen d'une visite virtuelle unique en GSV ont réussi leur parcours et ceci malgré le fait qu'un seul parmi eux n'a pas pu dessiner correctement son trajet. La réussite d'un parcours dans le réel sur la base d'une familiarisation avec les lieux au moyen de GSV est donc indépendante d'une représentation imagée du parcours, tandis qu'une réussite sur la base d'un plan 2D semble être fonction d'une image mentale du parcours.

Sur la base des questionnaires sur les stratégies utilisées nous avons pu nous faire une idée de la façon dont les participants ont structuré les connaissances spatiales exploitées lors de la tâche de navigation GSV en laboratoire. Le tableau 11 ci-dessous résume les stratégies types que les participants devaient classer, dans l'ordre de priorité selon lequel ces stratégies ont été exploitées au moment de la navigation. La Figure 19 résume ces classements prioritaires sous forme d'histogrammes.

***Tableau 11*: Cinq stratégies-type qui étaient à classer par ordre prioritaire d'emploi au moment de la tâche de navigation.**

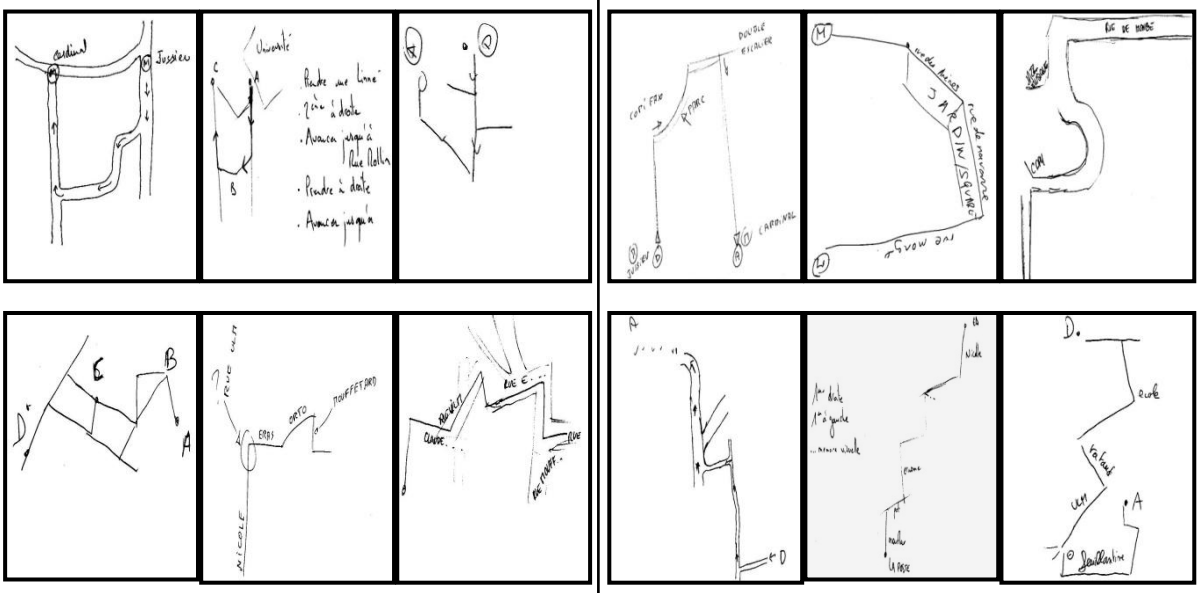
1	Verbaliser (tourner à droite puis à gauche)
2	Compter les d'embranchements
3	Se rappeler les noms des rues
4	Se rappeler l'emplacement des repères
5	Se faire une image mentale du trajet

Observations dans le réel

Carte 2D | *Visite guidée virtuelle*

a)

b)



Observations dans le virtuel

Carte 2D | *Visite guidée virtuelle*

a)

b)

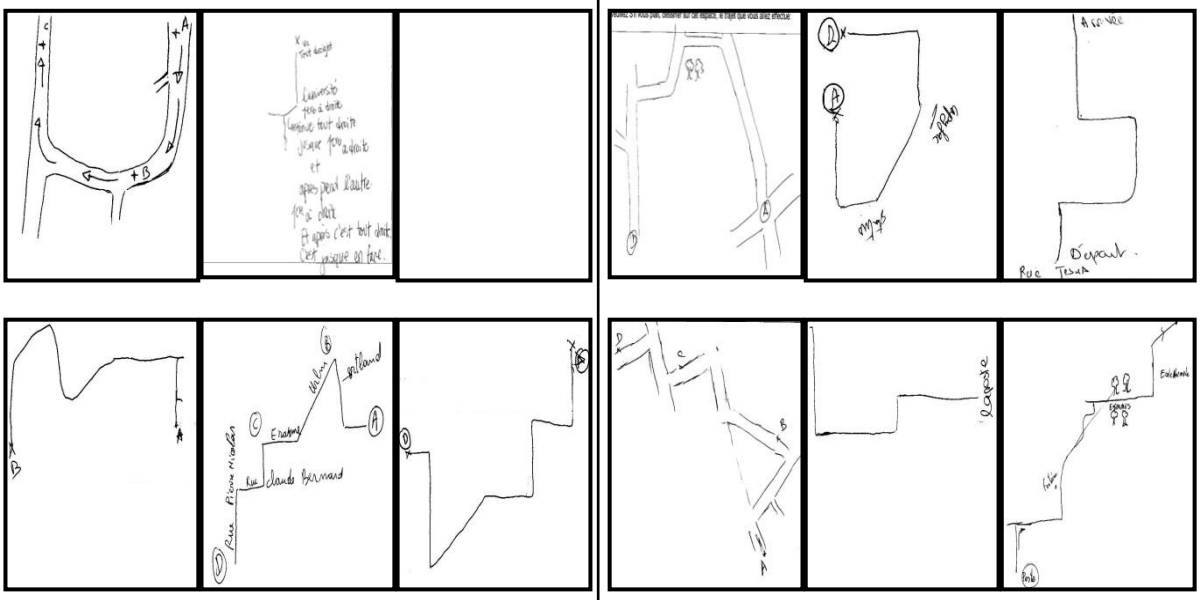


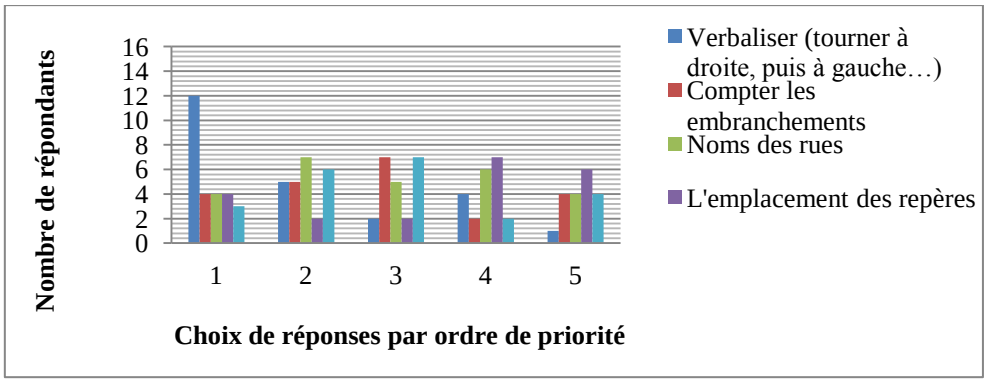
***Figure 18*: Les images mentales externalisées sous formes de dessins pour les parcours simples et complexes pour les deux conditions d'étude, plan 2D visuel et expérience directe en milieu réel et virtuel.** *a) représente les dessins des participants en parcours simple, b) les dessins des participants en parcours complexe.*

Lors de la navigation en milieu GSV sur écran d'ordinateur en laboratoire, en parcours simple et en condition du plan 2D (Figure 19a), les informations sont prioritairement verbalisées, puis on retient les noms des rues. Ensuite viennent les intersections et les repères dans l'ordre des priorités déclarées. Après une expérience directe en GSV, comme celle-ci est séquencée et les informations s'acquièrent étape par étape, aucun ordre de priorité particulier ne ressort du graphique du classement des stratégies (Figure 19b).

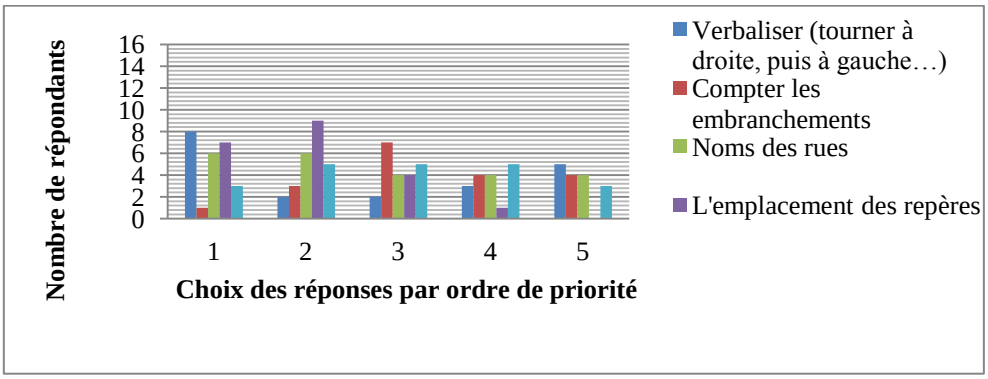
En parcours complexe en condition du plan 2D (Figure 19c), les participants semblent avoir prioritairement verbalisé les étapes ou trajets et mémorisé les noms de rues plutôt que de se faire une image globale du trajet ou de l'emplacement des repères. En parcours complexe après visite directe en GSV, les participants semblent changer de stratégie. Ils tentent de mémoriser prioritairement les noms des rues puis verbaliser les actions. En troisième rang vient l'emplacement des repères. La géométrie des routes et le nombre d'embranchements semblent avoir une priorité moindre (Figure 19d).

Lors de la navigation dans le réel, nous avons constaté que les participants en parcours complexe sur base d'une exposition préalable à un plan 2D tentent de mémoriser les noms des rues ainsi que le nombre d'embranchements. Par contre, en parcours complexe après expérience directe au moyen d'une visite virtuelle unique en GSV, les participants tentent de mémoriser en priorité les noms des rues, le nombre d'embranchements et en troisième rang l'emplacement des repères.

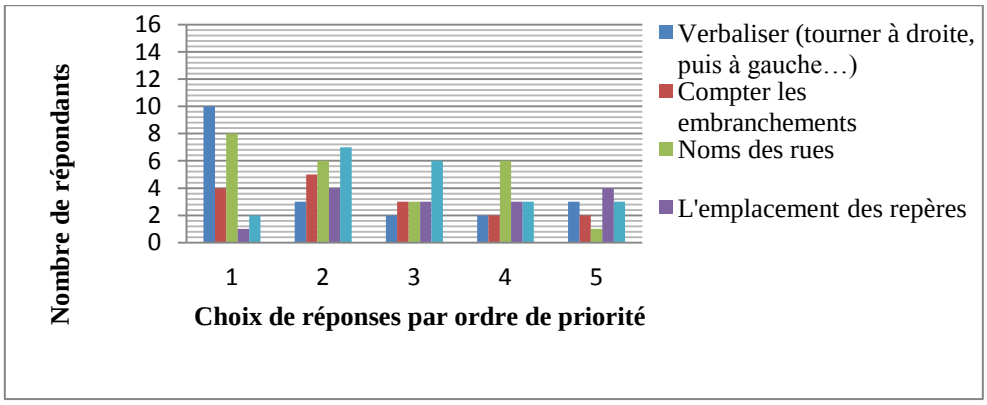
a)



b)



c)



d)

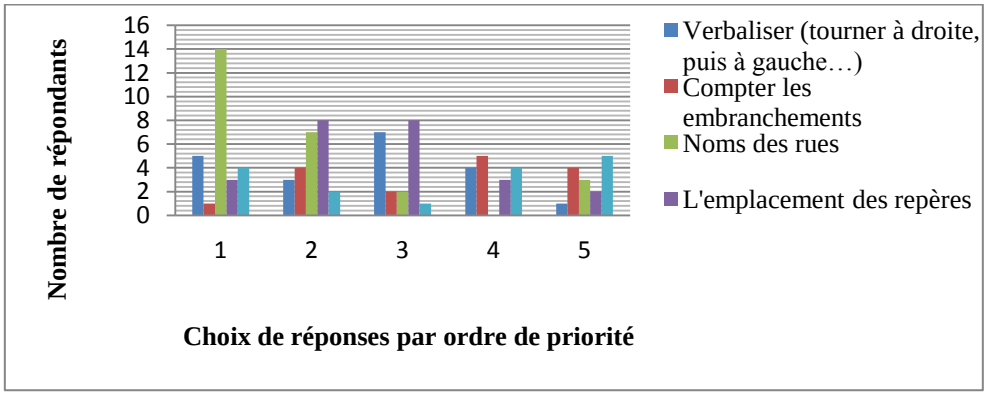
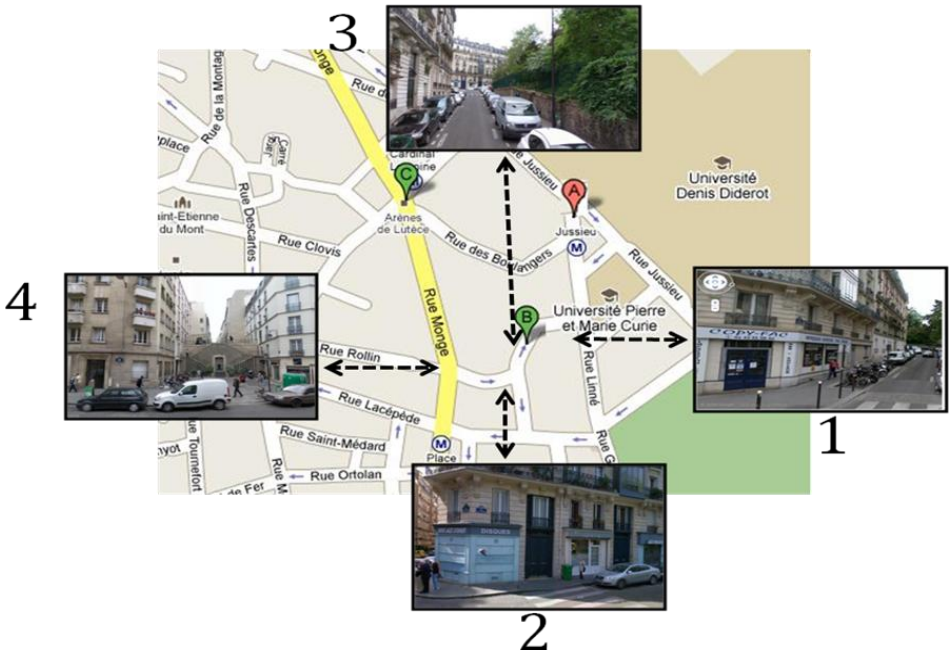


***Figure 19*: Choix de stratégies des participants.** *Chaque participant devait donner un ordre de priorité à une stratégie donnée. a) condition plan 2D en parcours simple en milieu GSV sur écran d'ordinateur. b) condition visite virtuelle unique en parcours simple en milieu GSV sur écran d'ordinateur. c) condition plan 2D en parcours complexe en milieu GSV sur écran d'ordinateur. d) condition visite virtuelle unique en parcours complexe en milieu GSV sur écran d'ordinateur.*

Reconnaissance visuelle-spatiale

Lors du test de reconnaissance visuelle-spatiale, on a demandé aux participants de reconnaitre des images du parcours et de les placer ensuite sur un plan 2D. De manière générale, les images les plus rappelées étaient surtout celles du début et de la fin des parcours. La Figure 20 et 21 ci-dessous résument les résultats de ce test de reconnaissance pour le parcours simple et complexe respectivement, après navigation en milieu virtuel (première partie expérimentale en laboratoire sur GSV) et après navigation en milieu réel (deuxième partie expérimentale sur le terrain à Paris).



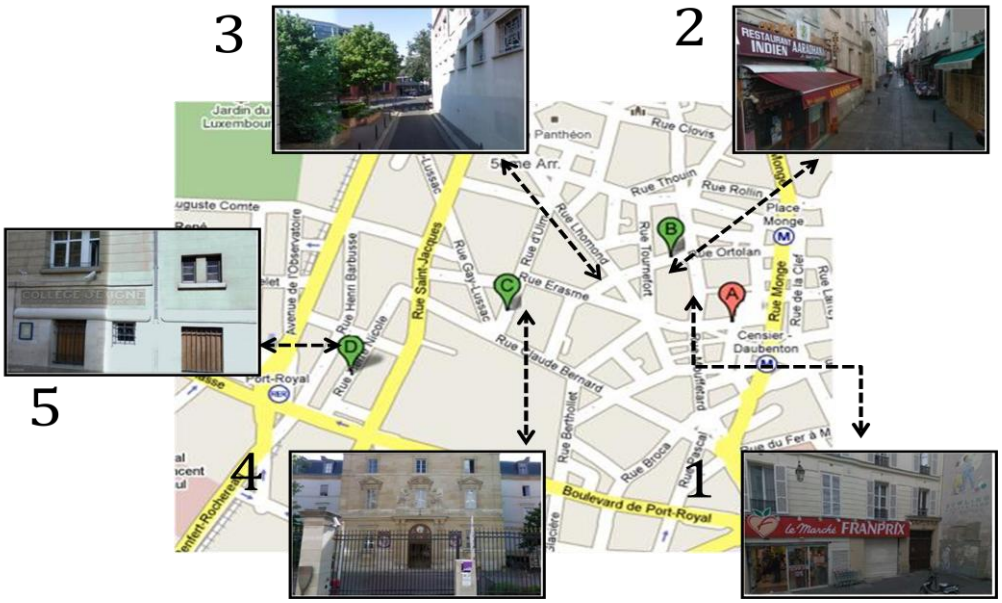
Navigation dans le réel

		Image 1	Image 2	Image 3	Image 4
Expo « **Plan** »	Reconnu	2	0	3	2
	Placé	1	0	2	2
Expo « **GSV** »	Reconnu	3	3	3	3
	Placé	3	3	3	3

Navigation en virtuel

		Image 1	Image 2	Image 3	Image 4
Expo « **Plan** »	Reconnu	18	4	21	14
	Placé	11	1	13	8
Expo « **GSV** »	Reconnu	22	7	24	22
	Placé	21	5	13	21

***Figure 20*: Reconnaissance visuelle-spatiale des repères du parcours simple.** *Le nombre d'images de repères reconnues pour une condition de familiarisation ou d'exposition (plan/GSV) donnée et le nombre relatif à leur bon positionnement sur une carte 2D sont indiqués.*


3
2
5
4
1
Jardin du Luxembourg
Panthéon
Rue Clovis
Rue Thouin
Rue Rollin
Place Monge
Rue Ortolan
Rue Erasme
Rue Tournefort
Rue Lhomond
Rue Saint-Jacques
Rue Henri Barbusse
Avenue de l'Observatoire
Rue Gay-Lussac
Rue Claude Bernard
Rue Berthollet
Rue Broca
Rue Monge
Rue de la Clef
Censier - Daubenton
Port-Royal
Boulevard de Port-Royal
Rue du Fer à Moulin
Rue Lacépède
Rue Pascal
Rue Mouffetard
Rue Lacépède
Rue Lhomond
Rue d'Ulm
Rue Lacépède
Rue Lhomond
Rue Lacépède
Rue Lhomond
Rue Lacépède
Rue Lhomond

IV.2.3. DISCUSSION

Cette étude a permis de mettre en lumière différents aspects relatifs à la cartographie cognitive des représentations virtuelles d'environnements réels, telles que les grandes agglomérations urbaines. Quand on demande à des individus de naviguer en GSV d'un point de départ vers une destination donnée après une expérience directe avec l'itinéraire virtuel, ils réussissent beaucoup mieux leur tâche et leurs performances spatiales sont moins affectées par la complexité relative des itinéraires par rapport à une exposition à un plan 2D avant navigation. Ces résultats sont cohérents avec les conclusions de certains travaux sur la navigation en milieu réel, où une expérience directe avec le réel avait donné les meilleures performances (Siegel & White, 1975; Evans & Pezdek, 1980; Passini, 1984; Golledge, 1999; Sun, Chan & Campos, 2004).

Différents auteurs ont suggéré que les environnements virtuels, à l'échelle appropriée, partageraient certaines caractéristiques fonctionnelles avec les environnements réels qu'ils simulent. Ces caractéristiques communes seraient alors exploitées par le navigateur de la même façon dans la construction de connaissances spatiales relatives aux repères, leurs emplacements dans l'itinéraire ainsi qu'aux distances relatives entre repères. Des études d'imageries fonctionnelles ont montré que ces types de connaissances spatiales sont encodés dans les circuits d'une mémoire très plastique du cerveau humain. Ces circuits réagissent aux environnements virtuels de la même façon qu'aux environnements réels (Jansen *et al*, 2007; Kupers *et al*, 2010).

L'inconvénient relatif d'une exposition préalable à un Plan 2D pourrait s'expliquer par l'absence d'information pertinente sur les repères et par des contraintes spécifiques pour la mémoire de travail dans la navigation sur la base d'un plan 2D (Tolman, 1948; Denis & Loomis, 2007; Meilinger *et al*, 2008). A la lumière des modèles contemporains de la mémoire de travail (cf Baddeley, 2003), ces contraintes se traduisent par des transformations mentales complexes de certains paramètres physiques des plans 2D (Schlenders et *al*, 2000) en des opérations de séquençage des routes (cf Denis, 1997 ; voir Figure 22).

L'expérience directe permet l'intégration, quasi-immédiate et dans le bon ordre, de l'emplacement de repères et des séquences de routes au moyen du calepin visuel-spatial (*« visual-spatial sketchpad »*).

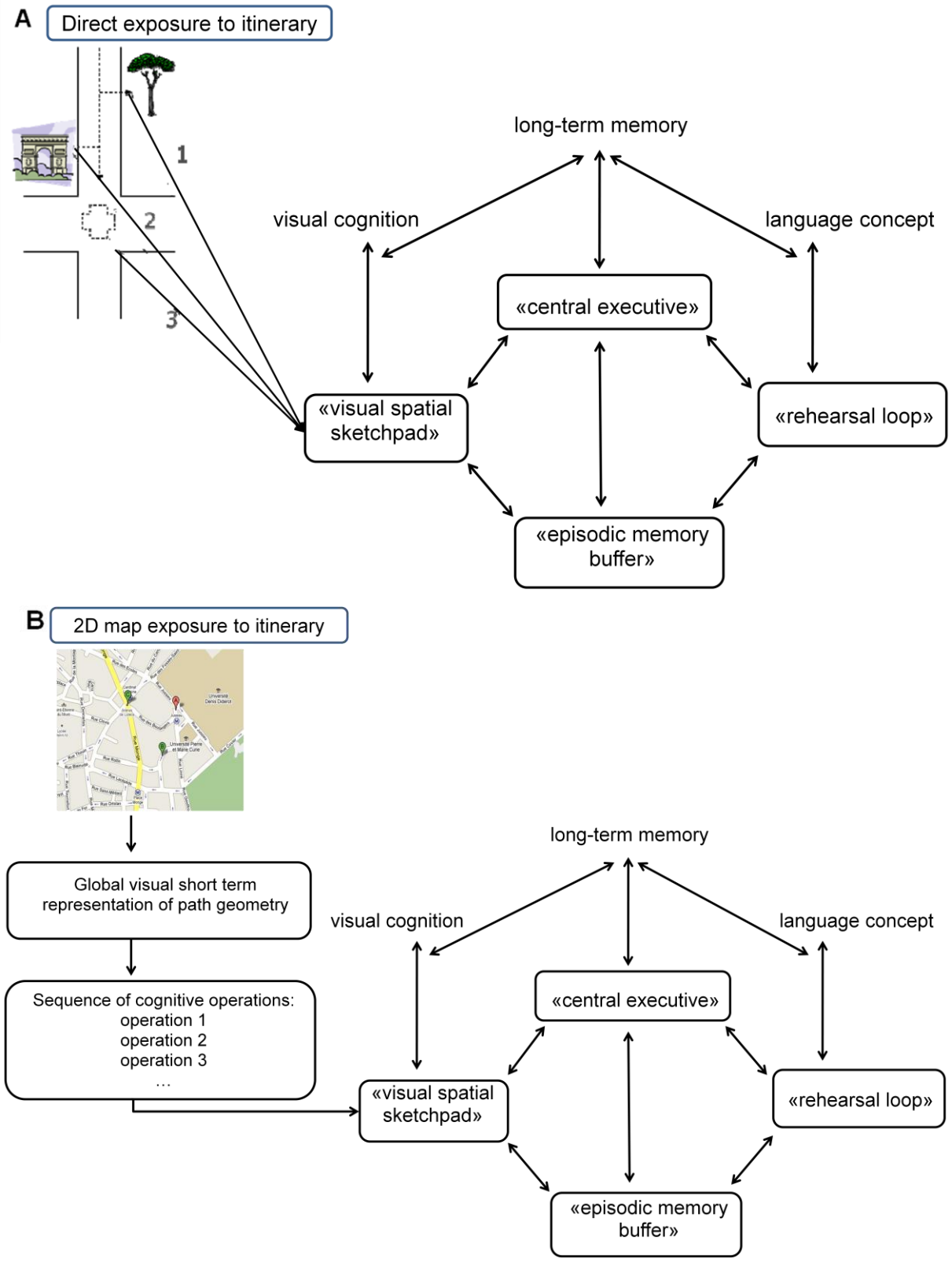


Figure 22 : Illustration schématique des opérations de la mémoire de travail dans la navigation après exposition directe (A) ou après exposition à un plan 2D (B) avant la tâche.

Une navigation sur la base du plan 2D requiert l'interprétation des représentations visuelles abstraites et une traduction de la disposition spatiale 2D des lieux et chemins en termes de séquences d'opérations locales. Les repères ne sont pas encodés lors d'une exposition à un plan 2D des routes.

Ces transformations mentales prennent du temps (cf Arthur *et al*, 1997), ce qui expliquerait les temps de navigation significativement plus longs après une exposition à un plan 2D dans notre expérience. De plus, la contrainte additionnelle que représentent de telles opérations mentales semble affecter plus sévèrement les performances des femmes et pourrait favoriser une augmentation du stress psychologique plus prononcée en comparaison avec les hommes. Effectivement, les personnes qui semblaient avoir eu du mal à construire une image mentale de l'espace sur la base du plan 2D n'arrivaient plus à s'orienter. Par contre, celles qui avaient bénéficié d'une expérience directe mais n'ont pas réussi à externaliser l'espace représenté sous forme d'un dessin ont tout de même réussi à retrouver leur chemin. Ceci semble suggérer que cette réussite était liée à un encodage efficace des repères lors de l'expérience directe au moyen de l'environnement virtuel. Cette interprétation est renforcée par le fait que les personnes qui se sont rappelées correctement tous les repères lors du test de reconnaissance visuelle-spatiale dans cette condition ont eu aussi les meilleures performances.

Tversky (1993) évoqua le terme de « collage cognitif » pour qualifier le processus d'élaboration d'une représentation des connaissances spatiales dans le *wayfinding*. Quand on se trouve dans un environnement non-familier, les connaissances préalables ne sont pas suffisantes pour générer une représentation mentale toute faite qui ressemblerait à une carte cognitive. Des erreurs d'alignement ou de choix par rapport aux directions reflètent certaines contraintes de la mémoire de travail. Les « collages cognitifs » fonctionneraient alors comme des couches thématiques à entrées multiples et associées explicitement à un point de vue. Ces fragments d'informations, quand ils sont faiblement reliés les uns aux autres, peuvent générer des contenus contradictoires. Dans les collages cognitifs on retrouve les repères, qui permettent de relier les routes en termes de séquences interconnectées et les travaux de Michon & Denis (2001) ont montré qu'ils servent de guide visuel à toute personne qui cherche son chemin dans un environnement géométriquement complexe et non-familier, comme celui des rues de Venise, qui suivent une géométrie parfaitement libre (Denis *et al*, 1999; Fontaine &

Denis, 1999). Tom & Denis (2003) ont ainsi identifié deux processus bien distincts de construction de connaissances relatives aux itinéraires dont l'un était basé uniquement sur les noms de rues verbalement communiquées et l'autre uniquement sur les repères. Les repères visuels semblent un moyen de *wayfinding* plus efficace que la mémorisation des noms des rues dans tout environnement urbain complexe et non-familier. Les travaux de Kalakoski & Saariluoma (2001), réalisés sur des chauffeurs de taxi, semblent corroborer d'avantage cette hypothèse. Ces auteurs avaient trouvé que les noms des rues d'une grande ville étaient plus difficiles à mémoriser, même par des experts en navigation urbaine, probablement parce-que ceci met en jeu de multiples interactions et interférences entre la mémoire de travail et la mémoire à long terme (voir aussi à ce sujet Bahrick, 1983). Nos analyses des questionnaires relatives aux stratégies en navigation virtuelle GSV montrent que nos participants avaient plutôt tendance à utiliser les deux types de stratégies à la fois, surtout quand le parcours était plus riche en informations ou trop complexe pour être facilement appréhendé au moyen d'une seule stratégie. Les noms des rues étaient beaucoup plus souvent évoqués par les participants en parcours complexe après exploration du plan 2D.

Certains repères seulement ont un pouvoir attractif et plus un repère est remarquable, plus il a une chance d'attirer notre attention, d'être encodé en vue d'un usage immédiat ou à long terme. Dans notre expérience, nous avons remarqué trois principales caractéristiques de repères qui avaient captivées l'attention des participants : la couleur, le caractère « naturel » d'un repère (arbre, par exemple) et sa position relative sur l'itinéraire. Plus un repère saillant est proche du navigateur, plus il est remarqué.

Il a été montré auparavant que les femmes font plus souvent référence aux repères que les hommes (Galea & Kimura, 1993; Denis, 1997). Dans notre expérience, nous n'avons pas noté de différence dans les images mentales externalisées des parcours, ou dans les stratégies évoquées, ou dans le rappel des repères visuels. Le processus mental qui consiste à relier une disposition spatiale 2D à la topologie du monde réel (ou virtuel) en 3D reflète des stratégies particulières et plutôt abstraites dans la représentation cognitive des environnements à grande échelle. Cette capacité semble se développer à des étapes précoces de l'ontogénèse, c'est-à dire assez tôt dans l'enfance (Siegel & White, 1975). Toute différence entre les sexes ici est fort susceptible d'être de nature épigénétique . Aussi, bien que l'augmentation de l'anxiété spatiale puisse être corrélée

aux compétences spatiales (Lawton, 1994), il semble probable que le stress psychologique des femmes et des hommes dans des tâches de résolution de problèmes spatiaux pourrait être une fonction différentielle complexe de l'âge. Certaines statistiques descriptives de cette étude (tableau 12) tendent à suggérer que cette forme de stress aurait tendance à diminuer avec l'âge chez les hommes et à augmenter avec l'âge chez les femmes.

----------Expérience 3

Représentation cognitive du milieu urbain sur la base d'informations tactiles ou d'indications verbales chez les personnes malvoyantes, aveugles et voyantes aux yeux bandés

Avant de nous aventurer dans des environnements non familiers, nous préférons nous familiariser avec les lieux au moyen d'un plan ou d'indications verbales efficaces, qui sont des modes d'aide indispensables dans la vie quotidienne des personnes aveugles ou atteintes d'un déficit visuel. Le neurologue Américain Bach-y-Rità était l'un des pionniers de la conception d'outils d'aide adaptés aux déplacements de personnes aveugles sur la base de fonctions tactiles (Bach-y-Rità *et al*, 1969). Pour la réalisation de cette troisième expérience, nous avons testé un matériel d'aide au déplacement pour les aveugles, développé par une entreprise Suisse et constitué d'un plan 2D tactile, thermo-gonflé, où les rues et les repères sont représentés en relief sur une dalle reliée à un ordinateur qui donne, lorsqu'on appuie du doigt sur une localisation particulière du plan, des indications verbales supplémentaires sur les noms des rues et les repères saillants. Ce dispositif est encore au stade expérimental et n'est donc pas encore disponible sur le marché.

Des études récentes, utilisant la technique d'imagerie fonctionnelle par résonance magnétique (fMRI), ont permis de montrer que les connaissances spatiales relatives aux points de repères, leur localisation sur un itinéraire et les distances qui les séparent, sont encodées dans le cerveau de l'homme dans des circuits neuronaux, reliés au *gyrus* de l'hippocampe, qui possèdent une surprenante plasticité fonctionnelle (Janzen *et la*, 2007). Ces circuits ont la capacité d'intégrer en une seule et même représentation des entrées sensorielles de canaux multiples. Ainsi, on a trouvé chez les aveugles congénitaux des représentations corticales d'environnements physiques dans des zones fonctionnelles quasi-identiques à celles identifiées chez les voyants (Kupers *et al*, 2010), en dépit du fait que la construction de ces représentations est passée par des canaux sensoriels assez différents, en grande partie visuels chez les voyants, et exclusivement tactiles, auditifs et proprioceptifs chez les aveugles congénitaux. Cette capacité du cerveau humain à intégrer des informations sensorielles provenant de sources multiples mais fonctionnellement équivalentes en une représentation corticale unifiée stable et, de ce fait fiable, témoigne d'une plasticité fonctionnelle à tous les niveaux du traitement de l'information, de l'encodage sensoriel au décodage par des structures de plus en plus centrales. Les études comportementales de D'Angiuilli & Kennedy (2001) sur des enfants aveugles congénitaux d'une part, et des enfants voyants aux yeux bandés d'autre part, ont permis de comprendre certaines des implications de la plasticité fonctionnelle vision-toucher pour le comportement de l'homme au cours du développement ontogénétique. Il s'avère que, d'une part, les enfants aveugles-nés

peuvent recopier des dessins sur la base d'informations tactiles avec une exactitude surprenante et, d'autre part, des enfants voyants aux yeux bandés sont capables d'acquérir très rapidement cette même capacité.

Cette plasticité vision-toucher a des implications importantes pour la rééducation fonctionnelle de personnes aveugles et malvoyantes qui doivent réapprendre à se repérer dans leur environnement physique. Des nouvelles technologies ont permis de développer des outils d'aide aux aveugles et malvoyants basés sur la fonction du toucher. Le plan tactile en relief, développé par la société ABA-plans à Genève, permet aux non-voyants d'explorer la géométrie 2D des rues et intersections de leur quartier afin que ces derniers puissent se représenter l'environnement et se déplacer de manière indépendante, pour faire une course ou visiter un endroit ou une personne particulière, par exemple. L'expérience, menée sur le terrain dans les rues d'un quartier de Montpellier, vise à 1) estimer l'efficacité de transfert des informations tactiles en comparant les performances de non-voyants ou malvoyants à celles de personnes voyantes à qui on a bandé les yeux 2) comparer les capacités de personnes avec différents niveaux de déficit visuel 3) évaluer la capacité générale de l'homme et de la femme adulte à élaborer une représentation spatiale fiable d'un environnement complexe et à grande échelle sur la base d'informations essentiellement tactiles et indirectes, véhiculées par la géométrie en relief du plan tactile. Les différentes stratégies employées par ces différents groupes d'individus au cours de la navigation de mémoire ont été analysées.

Comment les personnes aveugles développent-elles des compétences cognitives spatiales équivalentes à celles des personnes voyantes, sans pour autant avoir bénéficié d'expériences visuelles comparables ? Ou sans même avoir bénéficié d'aucune expérience visuelle, ce qui est le cas des aveugles congénitaux ? Quelques études antérieures ont comparé, après exposition directe des sujets à l'environnement étudié, les performances de navigation indépendante de personnes aveugles, de naissance (aveugles congénitaux) ou tardifs, et de personnes à la vue parfaitement intacte, a qui on avait bandé les yeux. Les résultats de ces travaux suggèrent que les compétences de navigation ne dépendaient que peu d'expériences visuelles, car tous les sujets aveugles avaient retrouvé leur chemin (Loomis *et al*, 1993), avec de meilleures performances que les voyants aux yeux bandés. Dans les travaux de Passini *et al* (1990) sur la navigation d'humains dans un labyrinthe, les personnes voyantes, à qui on avait bandé les yeux ou non, ainsi que des aveugles de naissance et tardifs, étaient parfaitement en mesure de

réussir la tâche. Les aveugles disposent ainsi de capacités cognitives liées à la représentation d'espaces complexes produisant de bonnes performances spatiales, souvent équivalentes à celles de personnes témoins voyantes.

Selon Thinus-Blanc & Gaunet (1997) les représentations spatiales construites à partir de modalités sensorielles autres que la vision (toucher, audition, olfaction, proprioception) devraient avoir le même statut que celles basées sur la modalité visuelle. Cette hypothèse a été confirmée sur des populations d'étude constituées de sujets voyants, privées temporairement de leur vision, et d'aveugles tardifs, qui avaient tous parfaitement réussi et sans difficulté une tâche de navigation complexe sur la base d'informations non visuelles. Les sujets d'un troisième groupe, tous aveugles de naissance, avaient de moins bonnes performances.

Deux niveaux essentiels, l'un perceptif, l'autre conceptuel, doivent être considérés comme supports complémentaires dans la cartographie cognitive, ainsi que les compétences d'orientation dans des environnements connus ou inconnus chez les personnes aveugles (cf Passini & Proulx, 1988; Ungar *et al*, 1996, cités par Lahav & Mioduser, 2004). Au niveau perceptif, d'autres sens tels que le toucher, l'audition ou encore l'odorat, doivent compenser l'absence de vision. Chez les aveugles congénitaux, cette compensation sensorielle devient primordiale dans le déplacement et dans l'orientation en environnements non familiers. Par ailleurs, au niveau conceptuel, l'accent est mis sur l'élaboration de stratégies appropriées pour une cartographie cognitive efficace de l'espace et la création de chemins et d'itinéraires. Les recherches sur ces stratégies cognitives indiquent que les personnes aveugles utilisent essentiellement deux stratégies : une qui s'appuie sur l'intégration des routes et l'autre sur l'intégration des plans. Les premières sont basées sur une reconnaissance linéaire (séquentielle) des caractéristiques spatiales, tandis que les stratégies basées sur les plans, considérées souvent comme plus efficaces, impliquent la représentation interne de perspectives multiples d'un itinéraire (cf Fletcher, 1980; Kitchin & Jacobson, 1997). D'autres travaux, ont montré que les personnes aveugles avaient tendance à utiliser essentiellement le premier type de stratégie, basée sur l'intégration des routes, pour trouver leurs chemins dans des environnements non-familiers (cf Fletcher, 1980, cité par Lahav & Mioduser, 2004).

IV.3.1. MATERIELS ET METHODES

Nous avons étudié les paramètres relatifs aux performances de navigation à travers un environnement urbain réel dans la ville de Montpellier chez des sujets aveugles congénitaux, tardifs, déficients visuel et voyants aux yeux bandés. Les étapes de familiarisation avant ont été réalisées 1) soit au moyen d'une expérience directe unique, qui consistait en une seule visite silencieuse du parcours, 2) soit au moyen d'une exposition indirecte au moyen du plan tactile 2D en relief du parcours, 3) soit au moyen d'indications verbales, répétées deux fois. Les sujets ont été testés d'abord dans une tâche de navigation simple, suivie d'une tâche plus complexe, à travers deux itinéraires choisis dans un quartier de Montpellier. Dans la phase d'exécution de la tâche de navigation, les sujets devaient retrouver de mémoire l'itinéraire qui leur avait été montré au cours de la phase de familiarisation au moyen d'une des méthodes décrites plus haut.

Pour avoir une idée des représentations mentales des parcours et des stratégies employées pour se repérer et retrouver un chemin, on a demandé aux sujets d'externaliser, sous forme d'un dessin, leur image mentale du parcours et de répondre à un questionnaire. Ceci consistait à dessiner de mémoire les parcours après chaque phase de familiarisation (visite guidée, plan tactile 2D, indications verbales) et à répondre à un questionnaire après chaque phase de test.

Participants

24 volontaires (14 hommes, 10 femmes), atteints ou non d'une déficience visuelle et tous des étudiants ou des professionnels, avaient accepté de participer à cette étude. Le tableau 12 représente les données individuelles des participants sur leur âge, le type de déficit visuel, l'acquisition et le type d'aide utilisé. Nous les avons classés, en fonction du degré d'atteinte de leur fonction visuelle, en quatre groupes distincts, constitués de 6 participants chacun. Dans ces groupes on retrouve les aveugles de naissance 'AN' (3 hommes et 3 femmes), les aveugles tardifs 'AT' (4 hommes et 2 femmes), les malvoyants 'M' (4 hommes et 2 femmes) et les voyants à qui on a bandés les yeux 'VYB' (3 hommes et 3 femmes). Leur âge était compris entre 23 et 72 ans et ils ont été recrutés sur la base d'un appel à volontaires, envoyé aux associations de malvoyants et aveugles de Montpellier et sur le site de l'UM2. Aucun des participants ne devait être familier avec le quartier de la ville qui constituait le terrain d'étude.

Tableau 12 : ***Les données individuelles concernant l'âge, le type de déficience visuelle et le mode d'acquisition.*** *M : Malvoyants ; AN : Aveugle de Naissance ; AT : Aveugle tardif ; VYB : Voyants à qui on avait bandé les yeux.*

	Sexe	Age	Déficience	Acquisition	Aide
M	1	23	OG=1/50 ; OD=1/50	Rétinite Pigmentaire à 6 ans	Canne
	1	31	1/60	Naissance	Canne + GPS
	1	40	OG=0 et OD 1/50	Naissance	Canne
	1	46	(O.G =0 depuis 20ans); O.D:2/10	Acquise	Aucune
	2	26	OG=0 et OD 1/50	De naissance	Canne
	2	72	OG=0, OD=2/10ème après correction	Naissance,	Canne
AN	1	42	Aveugle	Naissance	Chien guide
	1	48	Aveugle	Naissance	Accompagné
	1	60	Aveugle	Naissance	Canne
	2	41	Aveugle	Naissance	Chien guide
	2	46	Aveugle	Naissance	Canne (chien guide avant)
	2	46	Aveugle	Naissance	Canne
AT	1	58	Aveugle depuis 8 ans	Accident	Canne
	1	58	Aveugle, depuis 35 ans	Accident de voiture	Canne
	1	67	Aveugle	Rétinopathie diabétique	Canne
	1	72	Aveugle, depuis 35 ans	Accident (explosion)	Canne et accompagnateur
	2	44	Aveugle depuis 8 ans	Accident	Chien guide (canne avant)
	2	54	Aveugle, depuis 15 ans	Glaucome congénital	Canne (chien guide avant)
VYB	1	26	Yeux bandés		Canne
	1	30	Yeux bandés		Canne
	1	35	Yeux bandés		Canne
	2	23	Yeux bandés		Canne
	2	26	Yeux bandés		Canne
	2	32	Yeux bandés		Canne

Outils et mesures

Dans cette expérience, nous avons utilisé principalement deux outils, le plan tactile relié à un ordinateur pour l'exploration des parcours dans l'une des conditions de familiarisation et un système mobile GPS, activé uniquement lors de la phase d'exécution de la tâche de navigation. L'outil GPS était mis dans la poche du sujet avec l'instruction de ne pas y toucher et arrêté par l'expérimentatrice quand le sujet estimait qu'il était arrivé au point de destination. Le GPS nous a permis de récupérer, à la fin de l'expérience, les tracés des parcours individuels des participants sous format GPX, qui deviennent lisibles au moyen d'un logiciel appelé « GPSed » et nous informent sur les temps de navigation, les distances parcourues et le nombre d'arrêts et d'erreurs.

Le plan tactile, thermo-gonflé interactif (voir la Figure 23 pour une illustration) permettait aux sujets de cette condition de familiarisation d'explorer les routes et intersections d'un parcours donné, en deux dimensions, au moyen des doigts de la main. Le plan est activé et devient opérationnel lorsqu'il a été relié à un ordinateur. Dans cette étude il s'agissait d'un portable de la marque DELL avec un écran couleur 17 pouces. Les plans des rues de Montpellier sont imprimés en relief, sur une dalle ou tablette tactile, au moyen d'un procédé de thermo-gonflage, à partir des données géographiques officielles. Le dispositif utilisé dans l'expérience était un prototype simplifié, crée spécifiquement pour les besoins de l'expérience, et comprenant un logiciel de reconnaissance des plans 2D à partir d'une base de données et l'activation du plan au moyen du procédé mentionné. Ce logiciel permet également de calibrer les plans affichés en relief sur la dalle. Les plans étaient présents physiquement sur la dalle pour les sujets et visuellement sur l'écran d'ordinateur pour l'expérimentateur. Pour un plan donné, il existe deux modes d'activation, un mode avec instructions verbales spécifiques qui permettent de se familiariser avec l'outil et un mode opératoire qui permet de se familiariser avec un itinéraire donné. Nous avons sélectionné pour cette étude un plan tactile d'un parcours relativement simple et un plan d'un parcours plus complexe, activés sur la dalle interactive en fonction de la condition expérimentale.

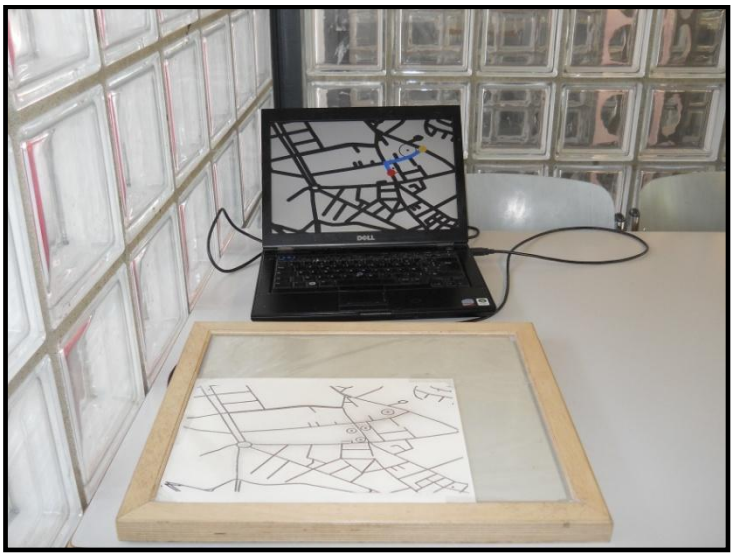


***Figure 23**: L'outil développé par la société Suisse 'ABAplans' à Genève. Un plan tactile thermo-gonflé placé sur une dalle, relié à un ordinateur. Lorsque l'on touche une des rues du plan, son nom est indiqué verbalement.*

Procédure

Les participants à ont été accueillis dans la Maison des Sciences de l'Homme de l'Université de Montpellier. Ils ont été informés des conditions de l'expérience et des tâches à effectuer : (1) familiarisation avec un parcours donné au moyen de l'une des trois conditions données (visite directe ou plan tactile 2D ou indications verbales), (2) dessin pour externaliser l'image mentale du parcours, (3) test de navigation pour retrouver l'itinéraire de mémoire en milieu réel, (4) répondre aux questionnaires. L'expérimentatrice était présente à quelques mètres derrière le sujet lors de la phase de test pour surveiller la navigation depuis le point de départ jusqu'au point d'arrivée, pour noter les arrêts et erreurs et pour arrêter le dispositif GPS en fin de parcours.

Chacun des 24 participants était d'abord confronté avec le parcours simple et ensuite avec le parcours complexe. Deux participants de chacun des quatre groupes ('AN', 'AT', 'M' et 'VYB') ont été confrontés à l'une des trois conditions de familiarisation. En condition de visite directe, les participants étaient accompagnés en silence depuis le point de départ jusqu'au point d'arrivée. En condition du plan 2D tactile, les participants avaient pour instruction d'explorer le plan 2D du parcours installé sur la dalle. Ils devaient d'abord se familiariser avec l'outil et, ensuite ils avaient deux

minutes pour se familiariser avec l'itinéraire en mode opératoire du plan. Les noms des rues étaient indiqués par une voix système lorsqu'on touchait une rue. En condition de familiarisation par indications verbales, qui ont été données deux fois de suite, au moyen d'une lecture répétée, par l'expérimentatrice, les participants recevaient les instructions suivantes:

En condition de parcours simple :

1) en sortant de l'institut, prenez immédiatement à droite et marchez jusqu'au premier carrefour
2) au carrefour, prenez à gauche et
3) marchez jusqu'à atteindre une pharmacie
4) c'est votre point d'arrivée

En condition de parcours complexe :

1) en sortant de l'institut, prenez immédiatement à droite et marchez jusqu'au premier carrefour
2) au carrefour, traversez et
3) prenez directement à gauche jusqu'au prochain carrefour
4) au carrefour tournez immédiatement à droite
5) continuez tout droit jusqu'au rond point
6) au rond point, prenez à gauche
7) marchez un peu puis traversez au passage piéton
8) continuez jusqu'à l'arrêt de tram,
9) c'est votre point d'arrivée.

Après la familiarisation, chaque sujet devait externaliser son image mentale du trajet au moyen d'un dessin. La phase de test, c'est-à-dire la navigation de mémoire dans l'environnement réel, était exécutée immédiatement après et arrêtée dès que le participant estimait avoir atteint le point d'arrivée de son parcours. Après le test, les

participants devaient répondre à des questions, posées par l'expérimentatrice, sur les stratégies utilisées et les repères multi-sensoriels qu'ils avaient utilisés lors de la phase de test.

Caractéristiques des itinéraires « simple » et « complexe »

Les parcours simple et complexe à travers certaines rues du centre de Montpellier avaient été sélectionnés sur la base de leur proximité de la Maison des Sciences de l'Homme et de paramètres physiques de complexité relative, tels que la distance entre le point de départ et le point d'arrivée, le nombre d'intersections et celui de tournants critiques présents dans l'itinéraire. Le tableau 13 ci-dessous résume ces caractéristiques.

***Tableau 13*: Résumé des caractéristiques physiques des itinéraires simple et complexe potentiellement critiques pour la navigation de mémoire.** *On y retrouve la distance en mètres, le nombre d'intersections (« intersections ») et celui de tournants critiques (« critical turns »).*

itineraries	« simple »	« complex »
distance (m)	160	600
intersections	4	11
critical turns	1	6

Sur les plans 2D des parcours simple et complexe illustrés dans la Figure 24 ci-dessous on retrouve les repères, représentés sous forme de cercles, où le nom d'une rue est donnée verbalement lors du toucher. Nous retrouvons ici (1) la Maison des Sciences de l'Homme, (2) une pharmacie, (3) un fleuriste et (4) un café bar respectivement.

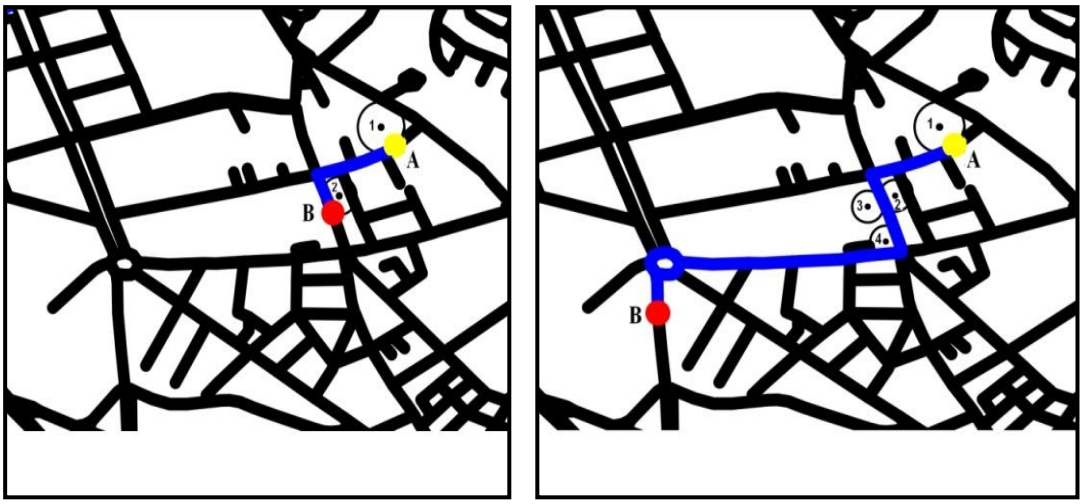


***Figure 24* : Représentations sous forme de plans 2D les itinéraires simple (à gauche) et complexe (à droite) de notre étude sur le terrain dans un quartier de Montpellier.** *'A' représente le point de départ, 'B' le point d'arrivée. '1' représenté la maison des sciences de l'homme, '2' la pharmacie, '3' un fleuriste, '4' un café bar.*

Questionnaire relatif aux stratégies

Tous les participants devaient répondre à des questionnaires après la phase de navigation. Dans ces questionnaires, ils devaient classer par ordre de priorité les sens utilisés pour retrouver un itinéraire donné, ainsi que cinq stratégies type (voir 'matériels et méthodes' de l'expérience précédente), dans l'ordre de priorité de leur emploi lors du test de navigation.

IV.3.2. RESULTATS

Performances de navigation : analyse descriptive

Nous avons procéde à l'analyse, par individu, par type de parcours, par type de déficit visuel et par mode de préparation à la navigation, ou familiarisation avec le parcours, des temps de navigation, des distances parcourues, du nombre d'erreurs et du nombre d'arrêts pendant la phase de navigation test, où les individus naviguaient seuls et sans aide. Ces données sont répertoriées dans les tableaux 14 et 15 relatifs à cette expérience.

Il convient de rappeler qu'en phase test, les individus naviguaient seuls et sans aide. Les individus voyants avaient les yeux bandés pendant la phase de familiarisation et pendant la phase test. Les données des tableaux 14 et 15 montrent que les malvoyants sont, de manière générale, les plus rapides, faisant le moins d'erreurs et d'arrêts. Les aveugles congénitaux naviguent considérablement plus vite et font nettement moins d'erreurs que les voyants aux yeux bandés ou les aveugles tardifs, quelque soit la préparation au parcours avant le test. La préparation au parcours au moyen du plan tactile produit des performances équivalentes et parfois meilleures lors de la navigation test, par rapport à la préparation au moyen d'une visite guidée préalable ou d'instructions verbales. Cependant, les temps de navigation les plus longs et le nombre d'erreurs et d'arrêts le plus élevé sont observés chez les individus voyants aux yeux bandés, en condition de parcours complexe après préparation au moyen d'instructions verbales les plus désavantagés surtout pour le plan tactile. La variabilité des temps de navigation est considérable, comme le montrent les statistiques descriptives répertoriées ci-dessous dans le tableau 16.

On note, de manière générale, que les aveugles congénitaux naviguent plus vite seuls que les aveugles tardifs et considérablement plus vite que les voyants aux yeux bandés. Les aveugles congénitaux et les voyants aux yeux bandés naviguent plus vite après familiarisation au moyen du plan tactile, comparé à une familiarisation par instructions verbales.

<u>Tableau 14</u>: Les temps de navigation, distances parcourues et les nombres d'erreurs et d'arrêts sont répertoriés ici par individu, type de parcours (simple/complexe), type de déficit visuel (aveugle congénital/aveugle tardif) et par mode de préparation à la navigation, ou familiarisation préalable avec le parcours (visite guidée/plan tactile/instruction verbale). *Il convient de rappeler qu'en phase test, les individus naviguaient seuls et sans aide.*

performance raw data 1	**congenitally blind** ♀=3 ♂=3 **age 41-60**		**blind** ♀=2 ♂=4 **age 44-72**	
guided tour	«simple» (~160 m)	«complex» (~600 m)	«simple» (~160 m)	«complex» (~600 m)
time (seconds)	188 187	676 817	628 277	1218 1167
distance (meters)	149 190	624 584	182 167	730 728
wrong turns/stops	0/1 0/0	0/0 1/0	1/0 3/0	1/0 2/5
tactile map	«simple»	«complex»	«simple»	«complex»
time (seconds)	297 296	814 787	473 341	1124 668
distance (meters)	109 140	926 688	203 132	566 672
wrong turns/stops	0/1 0/0	1/0 3/0	1/1 3/0	0/0 5/0
verbal instruction	«simple»	«complex»	«simple»	«complex»
time (seconds)	261 258	843 1218	284 279	1128 1098
distance (meters)	142 165	647 687	196 227	731 533
wrong turns/stops	0/1 0/0	0/0 2/2	0/0 0/0	1/0 3/3

<u>Tableau 15</u>: Les temps de navigation, distances parcourues et les nombres d'erreurs et d'arrêts par individu, type de parcours (simple/complexe), type de déficit visuel (déficient visuel/voyant aux yeux bandé) et par mode de préparation à la navigation, ou familiarisation préalable avec le parcours (visite guidée/plan tactile/instruction verbale).

performance raw data 2	**visually impaired** ♀=3 ♂=3 **age 23-72**		**seeing blindfolded** ♀=3 ♂=3 **age 23-35**	
guided tour	«simple» (~160 m)	«complex» (~600 m)	«simple» (~160 m)	«complex» (~600 m)
time (seconds)	179 194	608 844	600 454	1424 945
distance (meters)	185 166	637 580	160 150	649 596
wrong turns/stops	0/0 0/0	1/0 1/0	2/1 4/3	0/0 3/4
tactile map	«simple»	«complex»	«simple»	«complex»
time (seconds)	192 238	792 785	805 406	552 1200
distance (meters)	175 249	825 619	183 166	645 600
wrong turns/stops	0/0 0/0	1/0 1/0	1/0 2/0	1/0 2/0
verbal instruction	«simple»	«complex»	«simple»	«complex»
time (seconds)	324 205	510 531	690 600	2220 1200
distance (meters)	218 121	598 625	218 182	900 650
wrong turns/stops	1/0 0/0	1/0 0/0	0/0 2/2	3/1 5/5

Analyse de la variance (ANOVA)

Nous avons procédé, par la suite, à une analyse de la variance (ANOVA) des temps de navigation et du nombre d'erreurs dans les différents groupes et conditions. Le listing de sortie relatif à ces analyses est donné dans l'annexe 2 de la thèse. Pour cette analyse de la variance, nous avons adopté un plan d'analyse du type 4x3 pour le croisement équilibré des facteurs « type de déficit » à quatre niveaux différents et « familiarisation préalable » à trois niveaux différents. Les données étaient moyennées sur le facteur « type de parcours ».

***Tableau 16*: Les temps de navigation moyens, les écarts-type et les minima et maxima sont répertoriés ici par type de déficit visuel (aveugle congénital/aveugle tardif/déficient visuel/voyant aux yeux bandé) et par mode de préparation à la navigation, ou familiarisation préalable avec le parcours (visite guidée/plan tactile/instructions verbales).**

times	**guided tour**	**tactile map**	**verbal instruction**
congenitally blind	m: **548 sec** stddev: 291 min:296 max:814	m: **467 sec** stddev: 327 min:187 max:817	m: **645 sec** stddev: 470 min:218 max:1218
blind	m: **651 sec** stddev: 342 min:341 max:1124	m: **822 sec** stddev: 451 min:277 max:1218	m: **690 sec** stddev: 488 min:254 max:1128
visually impaired	m: **502 sec** stddev: 331 min:192 max:792	m: **456 sec** stddev: 326 min:179 max:844	m: **392 sec** stddev: 156 min:205 max:531
blindfolded	m: **740 sec** stddev: 347 min:406 max:1200	m: **855 sec** stddev: 431 min:454 max:1424	m: **1178 sec** stddev: 743 min:600 max:2220

L'analyse montre un effet statistiquement significatif du facteur « type de déficit » sur le temps de navigation ($F(1,3)=2.989$, $p<.05$) et sur le nombre d'arrêts ($F(1,3)=7.560$, $p<.001$). Les effets du facteur « familiarisation préalable » n'étaient significatifs ni sur le temps de navigation, ni sur le nombre d'erreurs. Nous pouvons donc considérer que les trois modes de préparation à la navigation (visite guidée, plan tactile, instructions verbales) sont fonctionnellement équivalents.

Succès de navigation et tracés GPS des parcours

Les résultats des participants sont représentés par les tracés GPS obtenus, dans les trois conditions de familiarisation, pour les parcours simple et complexe. (Figures 25a et 25b respectivement).

En parcours simple, nous avons observés 100% de succès de navigation pour les participants des groupes de malvoyants et d'aveugles congénitaux ou tardifs après une familiarisation à l'aide d'une expérience directe. Cependant, les participants appartenant au groupe de voyants à qui on avait bandés les yeux étaient incapables de retrouver leur chemin dans cette même condition. Ils nous avaient signalé qu'ils n'arrivaient pas à localiser le carrefour ou à savoir à quel moment ils s'y trouvaient. Lors de la phase de familiarisation, ils disaient avoir compté les pas au retour vers le point de départ, ce qui ne leur était d'aucune aide au moment de la navigation test.

Sur ce même parcours, en condition plan 2D tactile, seuls les participants du groupe des malvoyants ont réussi le parcours, dans les autres groupes seulement un participant sur deux a retrouvé le bon chemin à la destination finale. Les participants qui ont échoué disaient avoir, soit pris le premier tournant qui précède le carrefour, soit tourné à droite au carrefour au lieu de tourner à gauche. Ils semblaient avoir donc mal intégrés la configuration des routes et intersections et les directions critiques.

Parmi les participants qui avaient reçu les indications verbales, les aveugles tardifs et les voyants à qui on avait bandés les yeux ont bien réussi le parcours. Dans les groupes d'aveugles de naissance et de malvoyants, un participant sur deux seulement a retrouvé le bon chemin à la destination finale. Le premier carrefour leur semblait correspondre à ce qu'ils appelaient « un carrefour en T », avec un premier tournant à gauche.

Expérience directe *Plan tactile* *Indications verbales*

Malvoyants

Aveugles de naissance

Aveugles tardifs

Voyants aux yeux bandés

<u>Figure 25a</u>: Tracés GPS pour le parcours simple par condition de familiarisation et type de déficit.

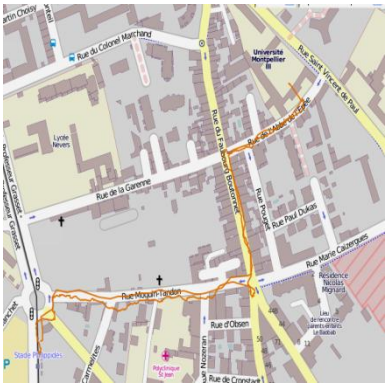
En parcours complexe, nous avons observé 100% de succès chez les participants des quatre groupes après une familiarisation à l'aide d'une expérience directe, c'est-à-dire tous étaient capables de retrouver le chemin du point de départ au point arrivée.

Les participants des groupes de malvoyants et d'aveugles tardifs ont tous réussi à retrouver le parcours complexe en condition plan 2D tactile. Seulement une personne sur deux avait réussi le parcours dans le groupe des aveugles de naissance. L'un d'entre eux s'était arrêté au rond point, dans l'incapacité d'avancer. L'autre avait fait un grand détour, le plan lui avait permis d'avoir une idée globale sur la localisation du point de destination, mais pas de l'itinéraire en soi. Aucun participant du groupe des voyants aux yeux bandés n'a réussi la tâche de navigation sur base du plan tactile. Une d'elle a oublié le parcours car il lui semblait impossible d'organiser les informations fournies par le plan tactile. L'autre s'était arrêtée au rond point, comme l'un des aveugles de naissance, ne sachant plus qu'elle direction prendre.

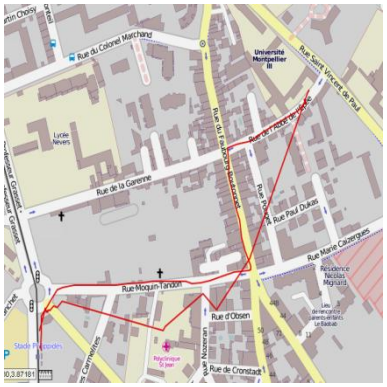
En parcours complexe, comme en parcours simple, le taux de succès est de 100% en condition de familiarisation par indications verbales chez les voyants à qui on avait bandé les yeux. Un sur deux aveugles de naissance seulement a retrouvé la destination finale après instructions verbales. Dans le groupe des malvoyants, les deux participants ont réussi à retrouver le point de destination, mais l'un d'entre eux avait pris un autre chemin.

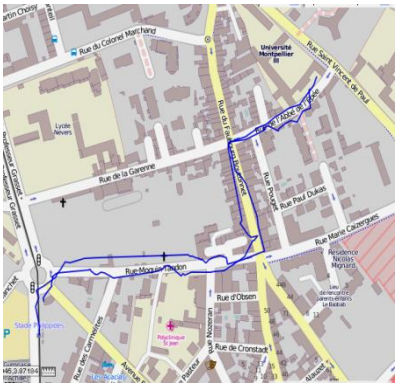
Expérience directe | Plan tactile | Indications verbales

Malvoyants

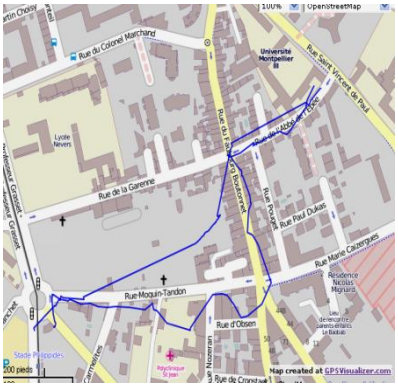


Aveugles de naissance

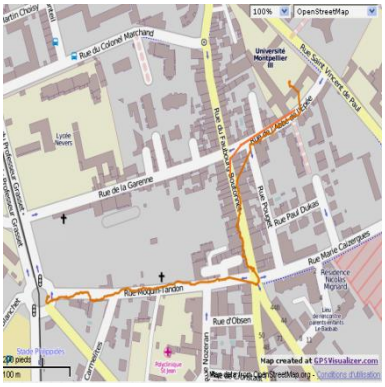


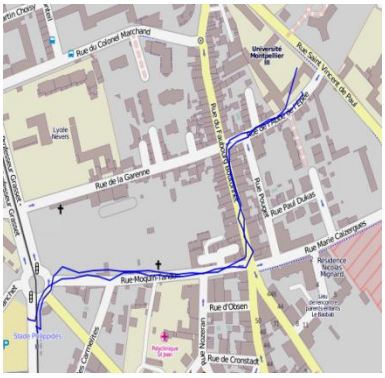


Aveugles tardifs



Voyants aux yeux bandés





<u>Figure 25 b</u> : Tracés GPS pour le parcours complexe par condition de familiarisation et type de déficit.

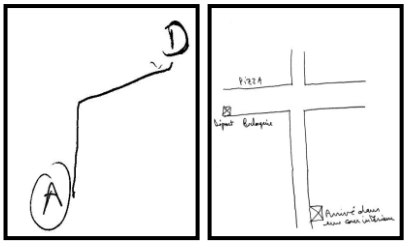
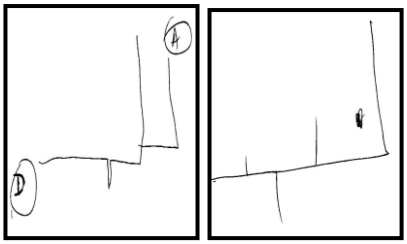
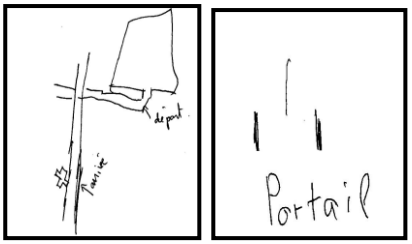
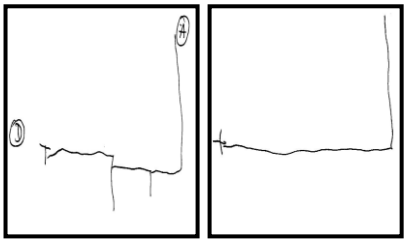
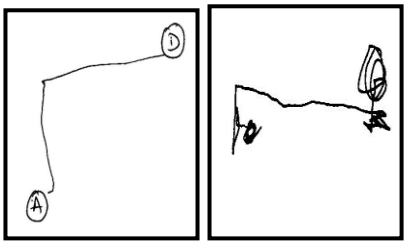
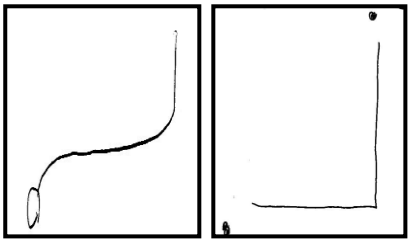
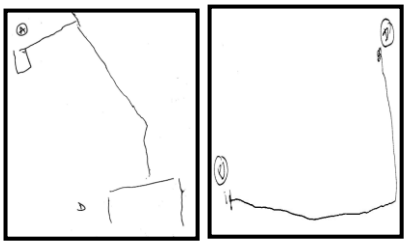
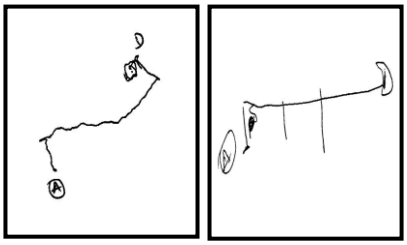
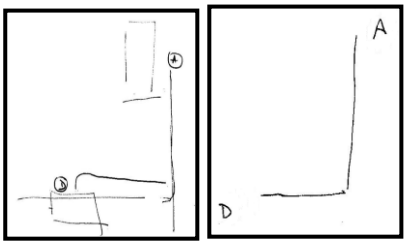
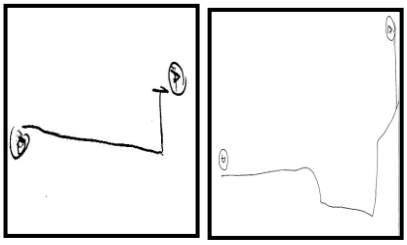
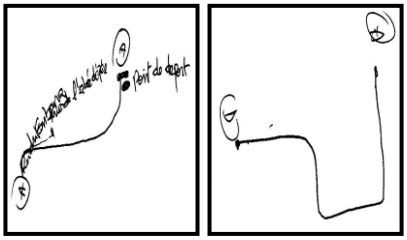
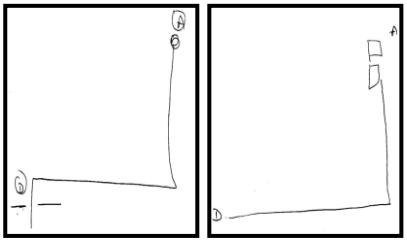
Images mentales des parcours et stratégies employées

Les participants de tous les groupes devaient dessiner de mémoire les parcours qu'ils venaient d'explorer en phase de familiarisation, sur la base d'un plan tactile 2D, d'indications verbales ou d'une visite directe. Dans les externalisations d'images mentales du parcours simple, représentées dans la Figure 26a ci-dessous, on retrouve trois types de dessins.

Des dessins à tracés simples ont été réalisés par 58% des 24 participants de tous les groupes et conditions. Dans ces 58% nous retrouvons des personnes qui ont échoué dans la phase test de navigation. En condition d'expérience directe, un voyant aux yeux bandé ayant échoué la tâche de navigation a pu dessiner le parcours simple. En condition plan tactile 2D, un aveugle de naissance, ainsi qu'un aveugle tardif et un voyant aux yeux bandés, ayant échoué la tâche de navigation, avaient produit des dessins du parcours simple, indiquant les points de départ et d'arrivée seulement.

Des dessins à caractéristiques particulières ont été produits par 25% des 24 participants. Ces 25% avaient dessiné les rues et leurs intersections, ou encore d'autres rues se trouvant le long du parcours. Ce type de dessin a été produit par des malvoyants dans les trois conditions de familiarisation, par des aveugles tardifs en condition de familiarisation au moyen du plan tactile 2D et par des aveugles de naissance après une expérience directe par visite guidée.

Des dessins désorientés où les directions des routes n'étaient pas correctement représentées ont été produit, en condition d'expérience directe, par un voyant aux yeux bandés et un aveugle tardif. Une seule personne était incapable d'externaliser une image mentale du parcours après avoir eu des indications verbales en parcours simple. Cette personne avait aussi, par la suite en phase test, raté son itinéraire.

	Expérience directe	*Plan 2D*	*Indications verbales*
M	 2/2	 2/2	 2/2
A N	 2/2	 1/2	 1/2
A T	 2/2	 1/2	 2/2
V Y B	 0/2	 1/2	 2/2

<u>Figure 26a</u>: Images mentales externalisées sous forme de dessins après la phase de familiarisation (expérience directe ou plan tactile 2D ou indications verbales) ainsi que le nombre de réussites en parcours simple. *M : Malvoyant ; AN : Aveugles de Naissance ; AT : Aveugles Tardifs ; VYB : Voyants aux yeux bandés.*

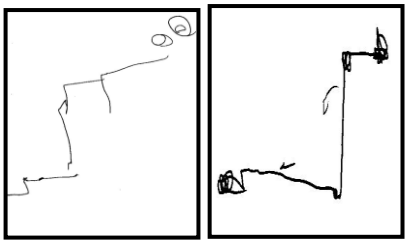
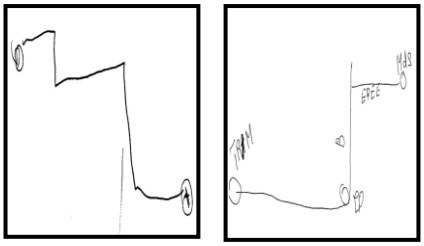
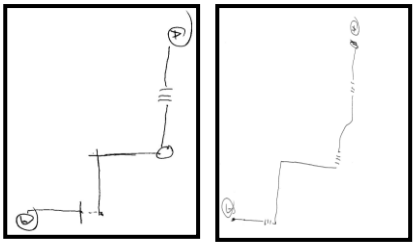
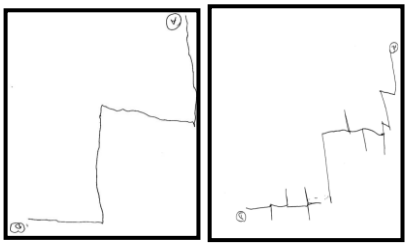
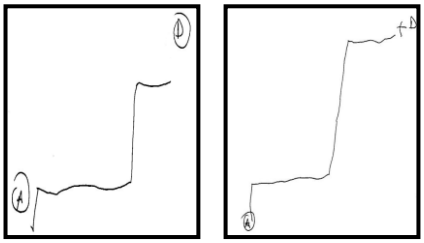
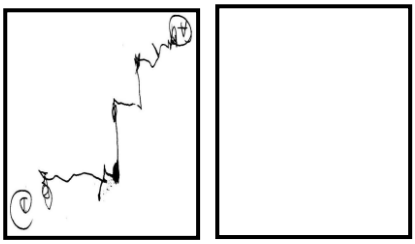
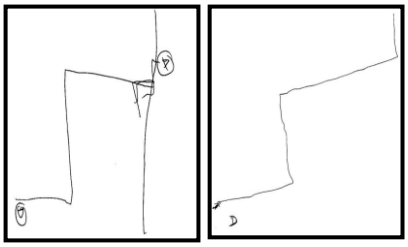
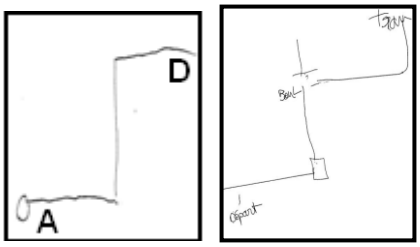
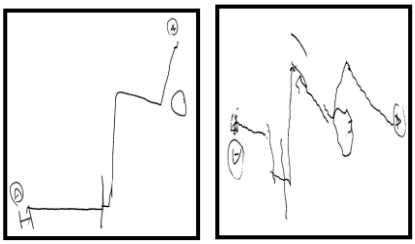
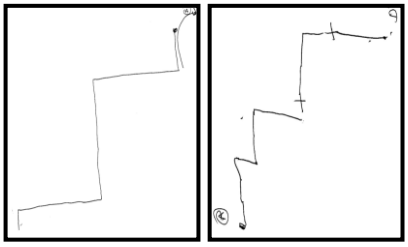
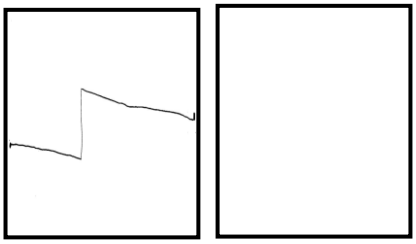
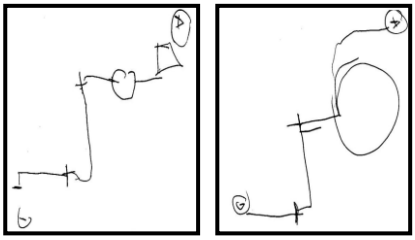
Des dessins reproduisant certaines caractéristiques des parcours, mais selon une autre disposition ou un autre point de vue (phénomène de rotation mentale) que celui du plan 2D ont été produites. Tous les participants à part les malvoyants ont dessiné avec rotation mentale après familiarisation au parcours simple au moyen d'expérience directe ou d'indications verbales. Les malvoyants et un voyant aux yeux bandés ont reproduit une rotation mentale dans leurs dessins après familiarisation au moyen du plan tactile. Les autres participants ont dessinés les parcours dans le sens où ils les avaient explorés au toucher.

En parcours complexe, les images mentales externalisées sous forme de dessins ont aussi révélé essentiellement trois types de dessins. Des dessins simples et assez véridiques qui, soit représentent uniquement la géométrie des routes, soit uniquement les points de départ et d'arrivée. 29% des participants en parcours complexe ont produit ce type de dessin, parmi eux un aveugle de naissance ayant échouée la tâche de navigation en phase test de navigation dans la condition du plan tactile 2D.

Des dessins à caractéristiques particulières, montrant par exemple les intersections ou d'autres détails tels que le rond point ont été produits par 50% des participants en parcours complexe, parmi eux le participant aveugle tardif ayant échoué le parcours complexe sur la base d'indications verbales.

Un taux de 12,5% des participants ont fourni des dessins incomplets du parcours complexe, où le dernier bout du parcours manquait, par exemple. Un dessin désorienté avec effet miroir a été réalisé par un malvoyant en condition plan 2D, qui a par la suite parfaitement réussi son parcours. Deux personnes étaient incapables de dessiner le parcours complexe après la phase de familiarisation au moyen du plan tactile 2D, ainsi qu'un participant voyant aux yeux bandés et un aveugle de naissance après indications verbales.

L'ensemble des dessins du parcours complexe, en fonction des différentes phases de familiarisation, sont représentés dans la Figure 26b.

	Expérience directe	*Plan 2D*	*Indications verbales*
M	 2/2	 2/2	 2/2
A N	 2/2	 1/2	 2/2
A T	 2/2	 2/2	 1/2
V Y B	 2/2	 0/2	 2/2

<u>Figure 26b</u> : Images mentales externalisées sous forme de dessins après la phase de familiarisation (expérience directe, plan tactile 2D, indications verbales) et le nombre de réussites individuelles en parcours complexe. *M : Malvoyant ; AN : Aveugles de Naissance ; AT : Aveugles Tardifs ; VYB : Voyants aux yeux bandés.*

Questionnaires sur les stratégies prioritairement employées

Nous avons analysé les ordres de priorité des sens que les sujets avaient estimé avoir utilisé pendant la navigation pour se repérer. Les Figures 27 et 28 résument les stratégies ainsi que la modalité sensorielle listées par ordre de priorité, pour les deux parcours respectivement.

Après familiarisation au moyen d'une expérience directe (Figure 27a), les participants semblent avoir privilégié la verbalisation d'étapes pour mémoriser le trajet. Les autres participants ont privilégié l'emplacement des repères et l'image mentale. La modalité sensorielle qui semble avoir été privilégiée par les participants de tous les groupes était l'ouïe, certains avaient privilégiés le toucher et, un sujet malvoyant, la vision.

Dans le parcours complexe pour la même condition, les participants semblent avoir privilégié la même stratégie que celle utilisée pour le parcours simple, la verbalisation d'étapes, et d'autres une image mentale de l'itinéraire. La modalité sensorielle privilégiée semble aussi la même, l'ouïe, sauf pour les voyants aux yeux bandés. Selon ces derniers, il était d'abord question d'éviter les obstacles par le sens tactile, impliquant la canne. Cependant, une seconde stratégie semble avoir été adoptée pour la mémorisation du parcours. Certains aveugles de naissance et tardifs et certains voyants aux yeux bandés ayant privilégié l'image mentale en premier avaient opté par la suite pour la verbalisation d'étapes (voir figure 28a). D'autres modalités sensorielles semblent avoir été utilisées en second ordre, tels que le toucher et l'odorat chez les aveugles de naissance, et l'ouïe chez les voyants aux yeux bandés. Les malvoyants qui semblent avoir en priorité verbalisé les étapes du parcours complexe, semblent avoir opté aussi pour d'autres stratégies, tels que l'image mentale ou l'emplacement des repères.

Après familiarisation au moyen du plan tactile 2D (Figure 27b et 28b), les participants semblent privilégier une stratégie basée sur une image mentale des deux parcours, simple et complexe, d'autres la verbalisation des étapes, comme les malvoyants et les aveugles tardifs en parcours simple et les aveugles de naissance en parcours complexe. La mémorisation des noms des rues du parcours complexe était la stratégie privilégiée pour l'un des participants voyants aux yeux bandés, ce qui n'était d'aucune utilité en toute occurrence, car ce participant a échoué son parcours en phase

de test. Pour ce même parcours, un participant malvoyant et un autre aveugle de naissance semblent avoir opté pour l'emplacement des repères en seconde stratégie.

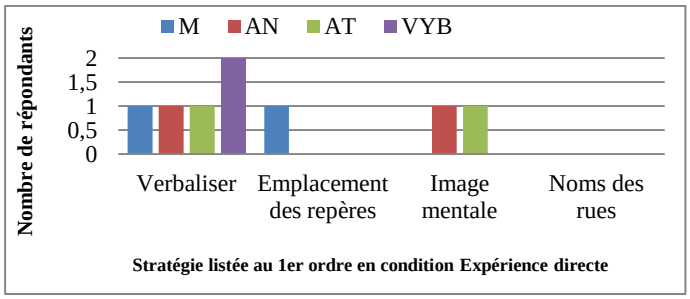
Les sujets déficients visuels avaient donc plutôt tendance à imaginer les parcours, or, les sujets voyants de l'expérience précédente semblent avoir privilégié la verbalisation d'étapes dans la condition équivalente du plan 2D visuel.

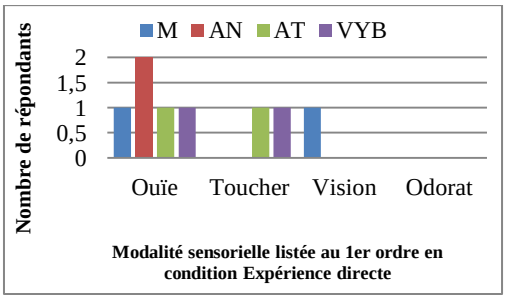
La modalité sensorielle privilégiée lors de la navigation sur parcours simple et complexe après familiarisation au moyen d'un Plan 2D semble être l'ouïe pour la plupart des participants, sauf pour les malvoyants, qui eux sembleraient avoir utilisé le toucher en priorité. Ce dernier semble avoir été utilisé en second ordre par les aveugles de naissance sur parcours complexe.

Après familiarisation au moyen d'indications verbales (Figure 27c), les stratégies et les modalités sensorielles préférentiellement listées sont similaires à celles de la condition du plan tactile 2D, mais uniquement en condition de parcours simple. La plupart des participants semblent avoir privilégié une image mentale du parcours après avoir reçu des indications verbales, d'autres ont privilégiés la verbalisation d'étapes. L'ouïe est le moyen de repérage prioritairement listé par la majorité des participants, hormis les malvoyants, qui attribuent une plus grande priorité au toucher, qui semble avoir été le moyen de repérage utilisé au second ordre par les voyants à qui on avait bandés les yeux.

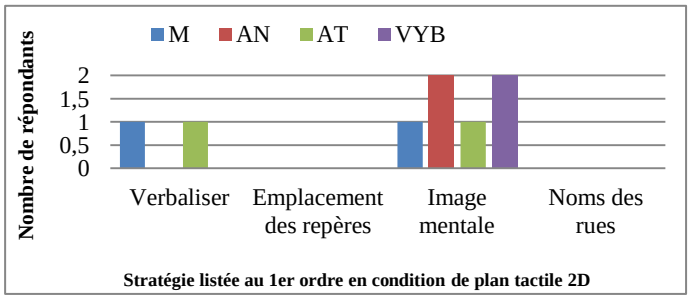
Les participants au parcours complexe (figure 28c) semblent avoir privilégié la verbalisation d'étapes, hormis les voyants aux yeux bandés, qui avaient privilégiés l'image mentale du parcours. Un des aveugles de naissance qui avait verbalisé en priorité le parcours complexe, semble également l'avoir imaginé mentalement en deuxième priorité. Les aveugles de naissance qui avaient privilégiés l'ouïe semblent avoir fait appel au toucher en deuxième stratégie.

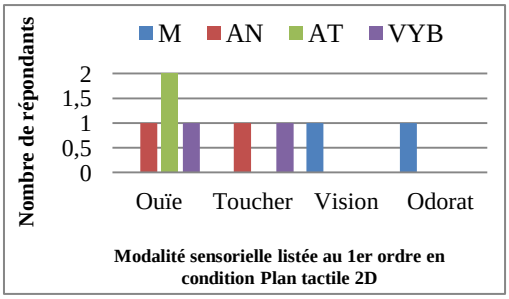
a)

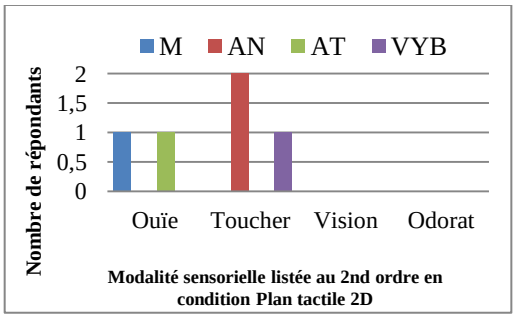




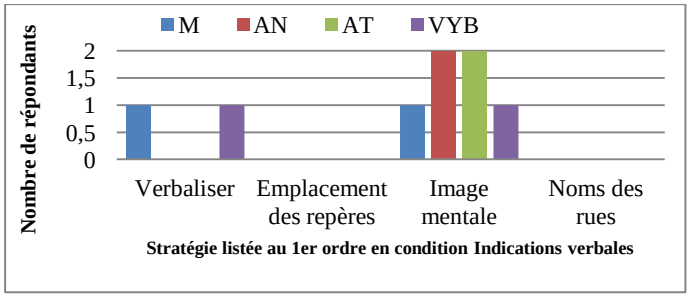
b)

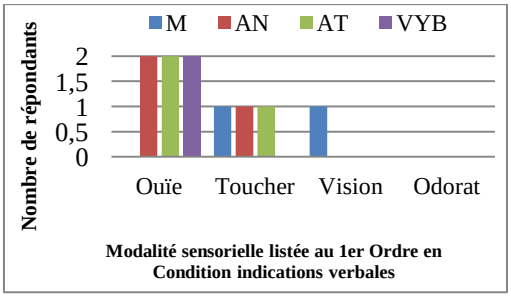


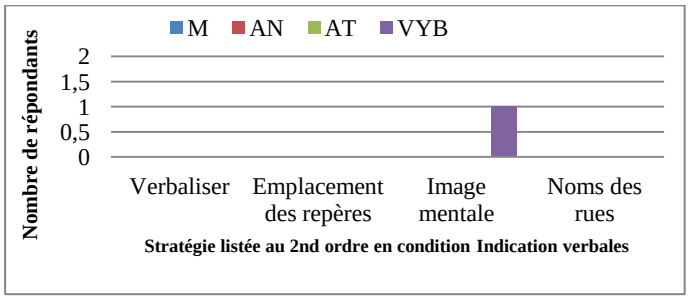


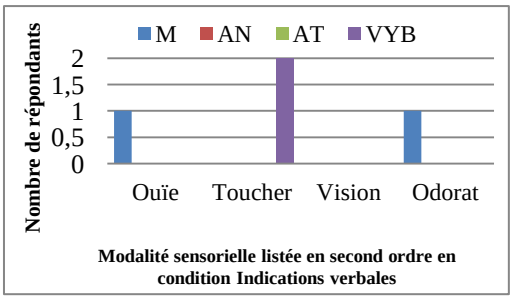


c)



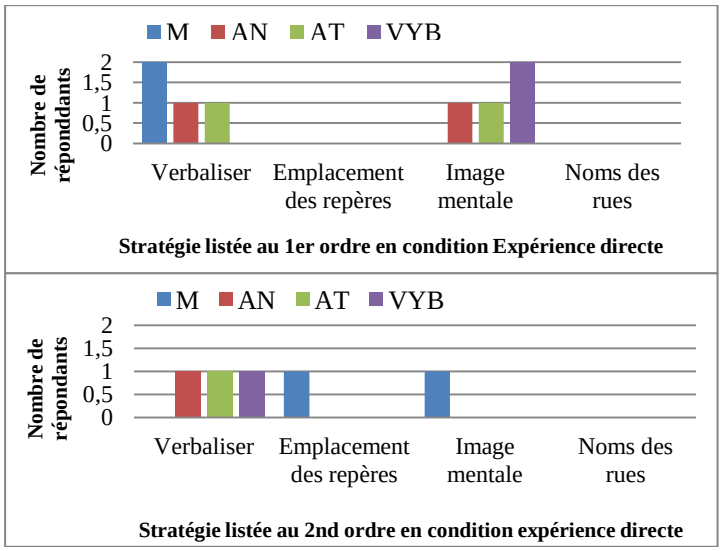


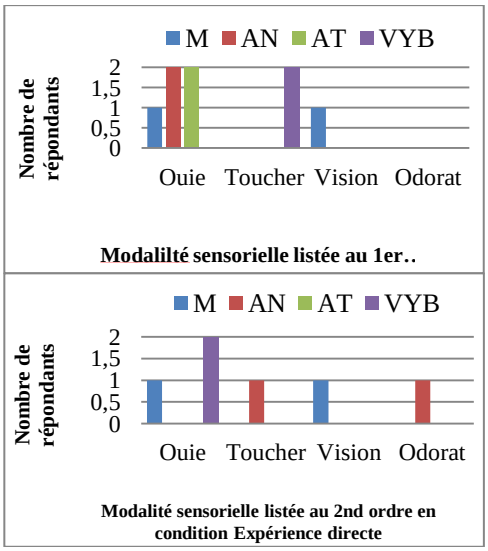




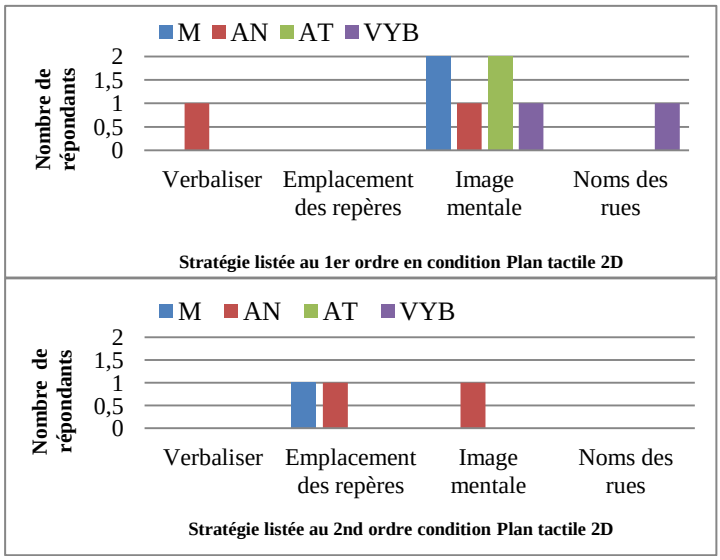
<u>Figure 27</u> : Stratégies jugées prioritaires en cours de navigation en parcours simple et modalités sensorielles utilisées en priorité par les participants de chaque groupe après familiarisation au moyen d'une expérience directe (a), d'un plan 2D (b), d'instructions verbales (c).

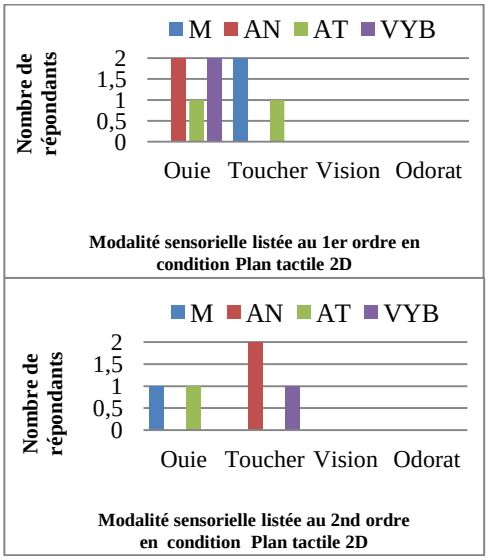
a)



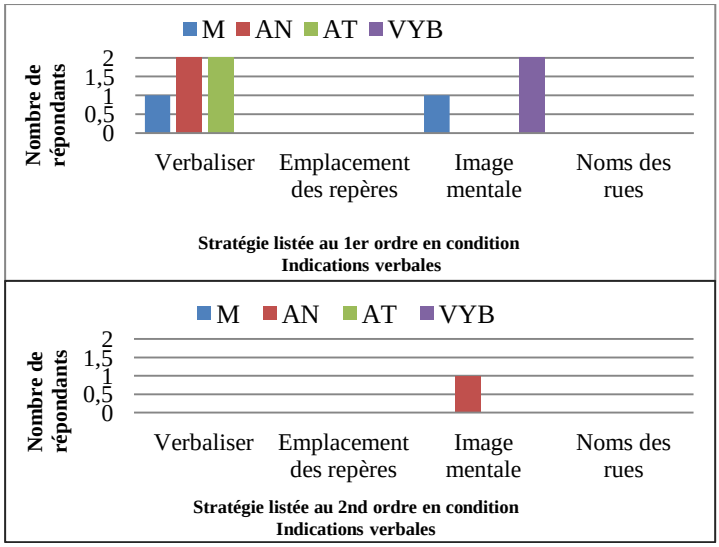


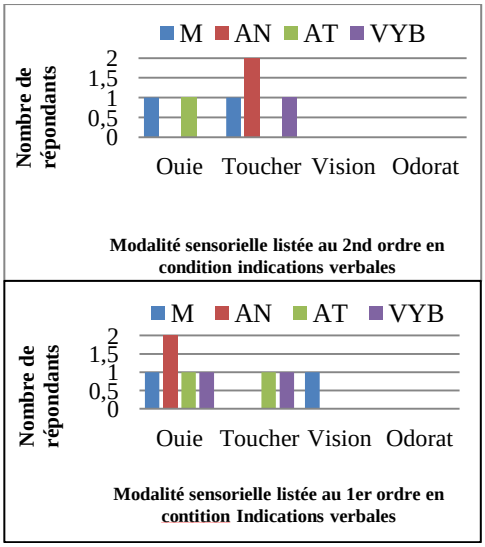
b)





c)





<u>Figure 28</u> : Stratégies jugées prioritaires en cours de navigation en parcours complexe et modalités sensorielles utilisées en priorité par les participants de chaque groupe après familiarisation au moyen d'une expérience directe (a), d'un plan 2D (b), d'instructions verbales (c).

IV.3.2. DISCUSSION

La navigation dans des environnements non familiers est une tâche très complexe que les déficients visuels tentent de résoudre quotidiennement. Cependant, toutes les personnes aveugles ou malvoyantes ne réussissent pas à se déplacer seuls sans recours soit à un guide humain ou animal, soit à des explications verbales pertinentes. Cette étude nous a permis de mettre en évidence leurs difficultés, ainsi que leurs compétences de navigation spontanée en milieu urbain non familier. Il faut signaler que les parcours que nous avons choisis en fonction de leurs caractéristiques géométriques n'étaient pas aussi simples qu'ils paraissent sur un plan 2D, visuel ou tactile. La difficulté se trouvait dans la structure de cet espace urbain, car il n'y avait quasiment pas de trottoirs qui à la base leurs servent de repères et de balises. De plus, l'absence de balises indiquant les passages pour piétons ne facilitait guère la tâche. Tous ses éléments sont absents dans les vieilles villes, ce qui constitue une charge cognitive supplémentaire et cause un stress énorme qui fait que les déficients visuels rentrent souvent chez eux épuisés. Les parcours simple et complexe avaient le même point de départ. Une des séquences de routes du parcours simple était partagée avec le parcours complexe. Pour la familiarisation avec ces parcours, trois méthodes différentes ont été employées ici, comme détaillées plus haut, nos observations clarifient certains points soulevés dans des travaux antérieurs.

Selon Hatwell (2003), les performances spatiales des aveugles précoces sont inférieures à celles des aveugles tardifs et des voyants privés de vue, surtout au niveau de la représentation des déplacements et des inférences de relations spatiales. Ces difficultés semblent liées aux périodes sensibles du développement sensori-moteur dans l'enfance (Gentaz & Hatwell, 1966; Millar, 1994; Warren, 1984; 1994; Worchel, 1951) et auraient tendance à s'atténuer à l'adolescence. Ainsi, dans l'apprentissage d'une route comportant sept points de repères on avait observé chez des aveugles âgés de 9 à 11 ans un très faible taux de réussite dans l'estimation des distances et la reconstruction des trajets sur une maquette, puis une nette amélioration à 14 et surtout à 17 ans. Chez les adultes, les résultats sont peu concordants, car les tâches sont de complexité variable. Dans certaines études, les aveugles précoces ont été considérés, comme souligné par Hatwell (2003), avoir plus de difficultés dans des tâches spatiales que les aveugles tardifs ou les voyants privés de vue (Cornoldi & Vecchi, 2000; Lederman *et al*, 1985). Dans d'autres travaux, il n'y avait pas de différences entre ces groupes (Klatzky *et al*,

1995). De toute évidence, les aveugles tardifs n'ont pas les mêmes difficultés que les aveugles précoces. Grâce à la coordination intermodale précoce qui, dès la naissance, met la vision et le toucher en communication (Streri, 2000), le sens du toucher des aveugles tardifs a été enrichi par la vision. Lorsqu'une cécité survient ensuite, le bénéfice apporté par les représentations sensori-motrices multimodales déjà construites persiste, même sans souvenir visuel conscient (Hatwell, 2003). Ceci explique pourquoi les personnes voyantes à qui on avait bandés les yeux dans notre expérience avaient néanmoins pu réussir leur parcours après une familiarisation par expérience directe ou par indications verbales. Grâce aux représentations sensori-motrices multimodales, ils ont pu compenser le manque de la vision en s'appuyant sur les autres sens, pleinement et efficacement sollicités lors de la tâche.

Notre étude a montré que les trois méthodes de familiarisation avec les parcours donnaient lieu à des performances statistiquement équivalentes. La plupart des participants étaient capables de transformer les connaissances spatiales acquises au moyen des différentes conditions de familiarisation en des séquences spatiales suffisantes pour leur permettre de réussir leur parcours. L'analyse des performances de navigation en termes de temps, d'arrêts et d'erreurs a montré que les malvoyants ainsi que les aveugles congénitaux naviguaient considérablement plus vite et faisaient nettement moins d'erreurs que les aveugles tardifs et les voyants aux yeux bandés, quelle que soit la préparation au parcours avant le test. Cependant, les voyants aux yeux bandés semblaient tout de même désavantagés, avec des temps beaucoup plus longs et moins de réussites surtout en parcours complexe, par la condition de familiarisation au moyen du plan tactile.

Il a été affirmé qu'aucune différence n'existerait entre les aveugles précoces et les voyants dans les seuils tactiles de détection et de discrimination (Hatwell, 2003), ou encore dans les seuils différentiels auditifs (Benedetti & Loeb, 1972; Starlinger & Niemeyer, 1981). C'est donc au niveau de l'orientation de l'attention et des modes de traitement des informations spatiales où les autres modalités permettent de compenser, comme, par exemple, chez les aveugles dans la discrimination des voix humaines et la mémorisation des chiffres (Miller, 1992). Les études par imagerie cérébrale fonctionnelle ont montré que la zone de projection corticale des doigts augmente lorsque les aveugles précoces deviennent de bons lecteurs en braille. Par ailleurs, les zones occipitales striées, recevant d'habitude les entrées visuelles, changent de fonction chez les aveugles précoces et deviennent alors actives dans des tâches tactiles (De

Volder *et al*, 1997, 1999; Hamilton & Pascual-Leone, 1998, cité par Hatwell, 2003). Cependant,cette réorganisation fonctionnelle ne survient que dans la cécité de naissance, ce qui indique que ce type de plasticité a une période sensible assez précoce dans le développement du cerveau.

L'échec des personnes voyantes à qui on avait bandé les yeux en condition du plan tactile 2D est certainement du à une incapacité de réorganisation fonctionnelle spontanée de circuits bien consolidés chez l'adulte voyant. Une réorganisation fonctionnelle spontanée est, de toute manière, assez rare mais a été trouvée chez certaines espèces au niveau des connections vision-audition, par exemple. Nous suggérons donc que l'échec des voyants en conditions du plan tactile s'explique au premier plan par le manque d'expérience en termes de stratégies de compensation sensorielle. Comme les sujets voyants se fient principalement à leur vision pour encoder les informations dans l'espace qui les entoure, la privation de ce sens les a rendus incapables de mettre en relation l'espace abstrait du plan tactile 2D et l'espace réel.

Les études relatives aux images mentales ont, dans les années 1980-1990, intéressé les psychologues et les chercheurs en neurosciences (Kosslyn, 1994b; Denis, 1989). Une des propriétés attribuées au système cognitif humain est celle d'être capable de penser avec les images. Selon Kosslyn (1994), les représentations imagées que l'individu crée sont fonction des informations perceptives reçues de l'environnement. Il existerait alors une relation d'isomorphisme entre les propriétés de la perception visuelle et celles des images mentales. La rotation mentale (Shepard & Metzler, 1971) et les jugements de taille relative (Paivio, 1978b) résulteraient de cette relation. Selon bon nombre d'auteurs, une image mentale se formerait sur la base de perceptions visuelles et sur celle de descriptions verbales et symboliques, donnant l'impression de semblable à un objet physique. D'autres auteurs ont proposé que la relation étroite entre une image mentale et la perception visuelle serait minimale, et que les images mentales seraient essentiellement de nature propositionnelle (Pylyshyn, 1973, 1981; Goldenberg, 1998; Bartolomeo *et al*, 1998). Le point de vue indéterministe met les deux théories en relation complémentaire, sachant que la nature des images mentales reste peu connue. Selon Denis (1989), les images mentales contribuent à construire le répertoire dans lequel les activités d'imagerie puiseront leurs contenus. L'absence de la vision ne signifie pas que les aveugles soient privés de cette activité. Nous avons remarqué ici que cette capacité était préservée chez les aveugles de naissance, tardifs et chez les malvoyants ainsi que participants privés de vue momentanément.

L'imagerie mentale visuelle active le cortex occipital de manière générale et plus particulièrement les aires visuelles associatives (Roland & Gulyas, 1994). Uhl *et al* (1994) ont étudié les images mentales tactiles chez les personnes voyantes et chez des sujets souffrant d'une cécité périphérique précoce, démontrant que les voyants avaient bien transformée l'information tactile en image. La même activation était observée chez des aveugles qui n'avaient aucune perception visuelle. D'autres études (cf Rösler *et al*, 1993) ont montré qu'une tâche de rotation mentale de formes tactiles chez les voyants et les aveugles congénitaux entrainait une topographie différente au niveau des EEG des deux populations. Lorsque les stimuli tactiles sont encodés, les sujets aveugles activent d'avantage la région occipitale alors que les voyants activent d'avantage la région frontale.

Presque tous les participants à notre étude étaient capables de fournir une image mentale au moyen d'un dessin de parcours. Ces dessins étaient structurés d'une façon très semblable à l'environnement réel en termes de géométrie des routes et des intersections. Les participants qui avaient reçus des indications verbales lors de la familiarisation avec les parcours avaient le plus tendance à imaginer le parcours mentalement. Ces résultats corroborent ceux obtenus dans les travaux de Noordzij *et al* (2006). Dans leur travaux, ils indiquent que les aveugles précoces et tardif peuvent développer une image mentale à partir de descriptions verbales et que l'expérience visuelle n'est pas essentielle pour le développement des représentations spatiales.

V. DISCUSSION GENERALE----------

Les outils qui ont émergé au cours des trente dernières années, par les biais de méthodes numériques et d'une technologie adaptée à l'assistance à la vie quotidienne des femmes et des hommes, nous ont permis d'envisager de nouvelles façons d'explorer les espaces qui nous entourent et de nous représenter des environnements de plus en plus vastes et complexes sur la base d'un seul regard sur un écran d'ordinateur . Cependant, la question de savoir si ces développements nous ont réellement fait progresser, où représentent un avantage tangible et indiscutable par rapport aux bonnes vieilles méthodes de la communication directe entre personnes ou des cartes 2D, imprimées sur support papier, reste entière. Les expériences réalisées ici dans le cadre de cette thèse ont permis de clarifier un certain nombre de points relatifs à cette question, ainsi qu' à celle de la représentation des espaces complexes, à moyenne et grande échelle, chez la personne dotée de toutes ses facultés perceptives d'une part et chez la personne présentant une déficience visuelle de l'autre. Un premier point à faire ressortir ici dans cette discussion générale concerne le problème de la reproduction fidèle de l'échelle d'un grand espace complexe et des distances relatives entre repères locaux (« *landmarks* ») au moyen des différentes aides à la navigation qui sont actuellement disponibles.

Représentation de l'échelle et des distances relatives entre repères

Afin d'être capable de bien se représenter un parcours dans un environnement complexe non-familier, l'homme a besoin d'informations perceptives qui lui permettent d'estimer avec une certaine fiabilité les distances relatives entre points de repères. Les résultats de l'expérience 1 au cimetière Père Lachaise avaient montré que l'outil virtuel développé pour visiter les lieux au moyen du web avant un parcours réel était totalement inefficace par rapport à ce critère. La navigation virtuelle par « saut de puces » d'une image panoramique fixe à une autre, ne permettait pas aux sujets d'extraire une information valable sur les distances entre repères, or, ces derniers étaient représentés sur les images dans le bon ordre et au bon emplacement par rapport au sens de l'itinéraire donné. Ce résultat suggère fortement que l'importance de repères locaux, même fortement saillants, dans la navigation en environnements réels complexes est tout à fait relative et que les repères, même si encodés dans le bon ordre

lors d'un parcours complexe, ne semblent être d'aucune utilité pour retrouver un itinéraire par la suite si les informations nécessaires sur les distances relatives n'ont pas pu être encodées (Boumenir *et al*, sous presse). Cette conclusion met en question la validité de tout outil de réalité virtuel censé aider la navigation conçu sans tenir compte de ce facteur. Les résultats de l'expérience 2 avec l'outil *Google Street View*, qui permet une visite des lieux d'une grande ville sur le web en mode de navigation continue et « comme si on était en voiture », suggèrent clairement que les sujets avaient pu extraire des informations de distance relative, comme lors d'une visite réelle, ce qui leur a permis de naviguer avec succès dans la phase test, en environnement virtuel aussi bien que dans l'environnement réel de Paris. Aussi, le bon transfert des connaissances spatiales acquises en mode de familiarisation virtuelle vers la situation de navigation test dans le réel sans autres aides suggère que la nature des informations visuelles virtuelles et réelles est essentiellement la même, pourvu que la géométrie relationnelle entre objets visuels virtuels et objets visuels réels soit la même. Ainsi, l'importance de repères locaux, sur lesquels on peut s'appuyer largement lors de la familiarisation avec un parcours par visite directe, par exemple, comme aides à la navigation a sans doute été surestimée dans la littérature (Evans, 1980; Michon & Denis, 2001; Golledge, 1999 ; Lovelace *et al*, 1999; Klippel & Winter, 2005). Les informations relatives à la configuration spatiale des routes et des intersections, que ces dernières soient communiquées visuellement ou au moyen d'une exploration tactile, semblent largement suffisantes pour extraire les informations nécessaires pour naviguer. Ceci est démontré dans ce travail de thèse par les bonnes performances obtenues avec des plans 2D visuels et tactiles lors des phases de familiarisation avec les parcours, simples aussi bien que complexes.

Géométrie de l'espace et représentation mentale d'environnements réels complexes

Certains auteurs se sont interrogés sur la nature des représentations spatiales chez l'homme en s'appuyant sur des données diverses. Il existe une controverse à ce sujet dans la mesure ou certains (cf Tversky *et al*, 1993) ont affirmé que la géométrie interne des espaces perçues ne pouvait correspondre à la géométrie Euclidienne ou Riemannienne utilisée pour décrire les espaces physiques. Ces auteurs s'appuient surtout sur les descriptions verbales d'itinéraires, mais sans se soucier de savoir quel type d'information était encodé le plus aisément, naturellement et efficacement par

l'homme. Montello (1992), en évoquant des expériences sur l'exploitation de données géographiques par la cognition humaine en situation réelle et dans des espaces à grande échelle, était l'un des premiers à mettre en question ce point de vue, en insistant sur le fait que les traces observables du traitement de l'information spatiale par l'homme suggèrent fortement que nos représentations des espaces complexes étaient fortement compatibles avec une représentation mentale sous forme de structures linéaires et relationnelles, Euclidiennes ou Riemanniennes.

Les résultats des expériences de cette thèse tendent à corroborer le point de vue de Montello en montrant qu'une exploration assez brève de simples représentations 2D d'environnements complexes et non-familiers à grande échelle permettait à la plupart de nos sujets d'élaborer des représentations fiables et pertinentes des parcours, se traduisant en général, par d'assez bonnes performances de navigation. Même si les femmes semblaient avoir plus de mal avec la familiarisation au moyen du plan 2D par rapport aux hommes. Cependant les différences observées n'étaient pas statistiquement significatives. Ceci pourrait, bien entendu, être du au fait que les échantillons de sujets n'était pas d'une taille suffisamment importante pour faire ressortir un effet du sexe. Néanmoins, il s'avère que la configuration géométrique linéaire des routes et des intersections, rendue accessible au sujet par le biais d'un seul regard sur le plan visuel 2D, semble véhiculer les informations spatiales les plus essentielles. Si alors l'importance des repères et symboles locaux dans la construction ou reconstruction mentale de parcours a souvent été surestimée, celles des informations géométriques, que l'on se réfère à des espaces Euclidiens ou Riemanniens, aura été quelque peu négligée. En résumé, la redoutable efficacité des plans 2D, visuels ou tactiles, démontrée à travers nos expériences, est fortement compatible avec un modèle cognitiviste qui conçoit l'encodage d'informations spatiales par le cerveau comme un système qui fonctionnerait par analogie avec une carte spatiale dont les coordonnées refléteraient la géométrie Euclidienne de l'espace externe.

L'origine neuronale de telles représentations géométriques a été étudiée d'abord par Tolman (1948) et plus tard par O'Keefe & Dostrovsky (1971), cités par O'Keefe & Nadel (1978). Ces auteurs ont identifié des neurones fonctionnellement spécialisés dans l'encodage de la géométrie des lieux et environnements externes. Ces neurones *(« place cells »*) ont été identifiés dans l'hippocampe du rat (pour une revue de question voir Poucet *et al*, 2010). Ils sont activés au maximum par la géométrie de lieux particuliers lorsqu'un rat est conditionné à se déplacer de manière répétitive dans un

environnement donné. Sur la base d'un nombre suffisant de ces neurones, on peut alors reconstruire la carte cognitive de l'animal par rapport à l'environnement donné. Lever *et al* (2002) ont montré plus récemment que l'activité de tels neurones chez des rats, exposés de manière répétée à deux lieux, de géométrie très différente, tend à diverger de manière progressive et graduelle au cours du temps d'apprentissage. La spécialisation fonctionnelle ainsi acquise perdure pour une période d'environ un mois et se transfère à des lieux ayant la même géométrie. Ceci témoignerait d'une certaine plasticité fonctionnelle des neurones impliqués dans l'encodage de l'espace chez le rat et il est tout à fait raisonnable de penser qu'une telle plasticité existe également au niveau des neurones du cerveau de l'humain.

Une majorité des approches expérimentales et théoriques sur la perception humaine et la représentation mentale d'environnements complexes à grande échelle néglige le fait que l'homme aussi bien que l'animal est tout à fait capable de retrouver une route, un chemin ou un parcours sans l'avoir exploré visuellement et sans instructions verbales. D'autres informations, auditives, olfactives, proprioceptives et tactiles peuvent le guider. Dans cette thèse nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la plasticité fonctionnelle des systèmes de représentation visuels et tactiles.

Plasticité fonctionnelle des représentations visuelles et tactiles d'espaces complexes

L'idée selon laquelle nos sens seraient des sources équivalentes de prise d'informations provenant du monde externe dans l'élaboration de représentations mentales et surtout spatiales remonte au psychologue Américan Gibson (1966). Gibson, critiqua le cognitivisme des années 1970-1980, qui selon lui était une regrettable « séquelle du behaviorisme », et il rejeta la notion de « carte cognitive » comme modèle de la représentation de l'espace chez l'homme. Gibson peut aussi être considéré comme le précurseur de la psychologie environnementale contemporaine, défendant le point de vue selon lequel les représentations de l'espace de l'homme étaient le reflet de ses interactions directes avec l'environnement. Ces interactions pouvaient, selon Gibson, se réaliser au moyen de n'importe-quelle modalité sensorielle ; il considéra ainsi les différentes modalités de la perception humaine comme fonctionnellement équivalents.

Le neurologue Mexico-Américain Pédro Bach-y-Rita exploita cette notion de substitution sensorielle dans le contexte de la rééducation fonctionnelle de patients aveugles, ou ayant perdu la vue pour cause d'une atteint neurologique, au moyen de

systèmes tactiles. Une des premières applications développée dans ce contexte était une chaise qui permettait aux aveugles de « voir » les objets dans leur espace proche au moyen du toucher (Bach-y-Rita *et al*, 1969)

Les résultats de l'expérience 3 de cette thèse ont montré sans ambiguïté que les adultes aveugles congénitaux naviguaient de mémoire, sur un itinéraire de ville qu'ils ne connaissaient pas, après avoir exploré un plan 2D en relief des routes. Cette navigation s'effectuait sans difficultés et avec de meilleures performances qu'avec une prise de connaissance de l'itinéraire au moyen d'instructions verbales. Ce résultat suggère que ses personnes n'avaient pas besoin d'une expérience visuelle au préalable pour pouvoir naviguer correctement. Le fait que des personnes voyantes aux yeux bandés arrivaient à se servir efficacement de l'outil tactile, avec de moins bonnes performances comparé aux aveugles, certes, corrobore l'hypothèse de l'équivalence fonctionnelle vision-toucher. D'Angiulli & Kennedy (2003) avaient, par ailleurs, montré que des enfants voyants aux yeux bandés apprenaient rapidement à se servir de leur sens tactile pour reconnaître des configurations visuelles. Leur capacité de décodage tactile d'informations perceptives devenait rapidement aussi bonne que celles d'enfants aveugles congénitaux du même âge.

Afin de permettre l'adaptation de l'homme aux pressions environnementales, la plasticité neuronale permet de modifier l'architecture fonctionnelle du cerveau à travers différentes expériences sensorielles (Bavelier & Neville, 2002; Pascual-Leone *et al*, 2005). D'après les travaux de Sadato *et al*, 1996 ; Burton *et al*, 2002, ou Ma & Han, 2011, le cortex occipital, qui est activé dans le traitement visuel chez les voyants, l'est aussi lors de la lecture du braille chez les individus déficients visuels, ce qui suggère un recrutement du cortex visuel chez l'aveugle. Aussi, l'activité occipitale chez les aveugles précoces semble corrélée aux performances dans des tâches impliquant l'audition telle que la localisation des sons (Gougoux, 2005) ainsi qu'à la mémoire verbale (Amedi *et al*, 2003).

Quelles sont réellement les limites de notre mémoire de travail ?

Même si le modèle de Baddeley (2003) est probablement l'un des plus étudiés et éventuellement le plus général et le plus heuristique, il semble y manquer une composante importante pour tenir compte des interactions multi sensorielles d'une part et du transfert sensoriel d'informations spatiales d'autre part. Même si Gibson avait tort

de rejeter la notion de cartographie mentale, il avait sans nul doute raison dans ses intuitions relatives à l'équivalence fonctionnelle vision-toucher. Ceci a d'importantes conséquences et implications pour les modèles de la mémoire de travail et, en s'appuyant sur celui de Baddeley, nous proposons que les notions de « calepin visuel spatial » ou de « boucle phonologique » méritent d'avantage d'explication fonctionnelle. Ainsi, nous pouvons considérer qu'il s'agirait plutôt, au niveau des sous-systèmes de la mémoire de travail spatiale, d'une sorte d'esquisse sensori-motrice à directions et de natures multiples plutôt que d'un calepin visuel-spatial. Une telle esquisse mettrait en jeu des traitements sensoriels parallèles plutôt qu'un filtrage sériel en vue d'un stockage temporaire de représentations essentiellement visuelles, comme le suppose le modèle de Baddeley. Au lieu de considérer l'autre sous-système de stockage temporaire sous forme d'une boucle phonologique, nous préférons le concept d'un processus de maintien dynamique, au moyen d'images mentales de lieux, d'objets et d'actions, essentiellement, formées sur la base d'une multitude d'entrées, verbales, tactiles, visuelles, olfactives ou auditives. (Figure 29) La répétition verbale explicite de certaines actions ou relations relatives à ces représentations n'est probablement qu'un aspect tout à fait accessoire au niveau de cette instance de maintien dynamique.

Un autre point important concerne la conception, archaïque à notre avis, de la mémoire de travail comme système de traitement à court terme et à capacité fortement limitée. D'autres auteurs, par ailleurs, ont mis en question cette conception sur la base d'observations qui montrent que la capacité d'encodage et de stockage de la mémoire de travail humaine était très variable selon les individus (Just & Carpenter, 1992). Nos propres résultats ici suggèrent, étant donné que nos participants avaient que très peu de temps pour se familiariser avec un environnement fort complexe, au moyen d'une exploration d'un plan 2D ou d'une visite virtuelle qui ne duraient que quelques minutes, par exemple, que la mémoire de travail a une capacité insoupçonnée, est capable de traiter en parallèle une multitude d'informations sensorielles et d'autre nature, provenant de sources très différentes, et fonctionne selon une dynamique complexe et en interaction permanente avec la mémoire à long-terme. Comprendre les processus mentaux et neuronaux qui permettent d'expliquer comment la mémoire de travail interagit avec la mémoire à long terme reste un des défis majeurs à relever, en sciences cognitives aussi bien qu'en neurosciences fonctionnelles.

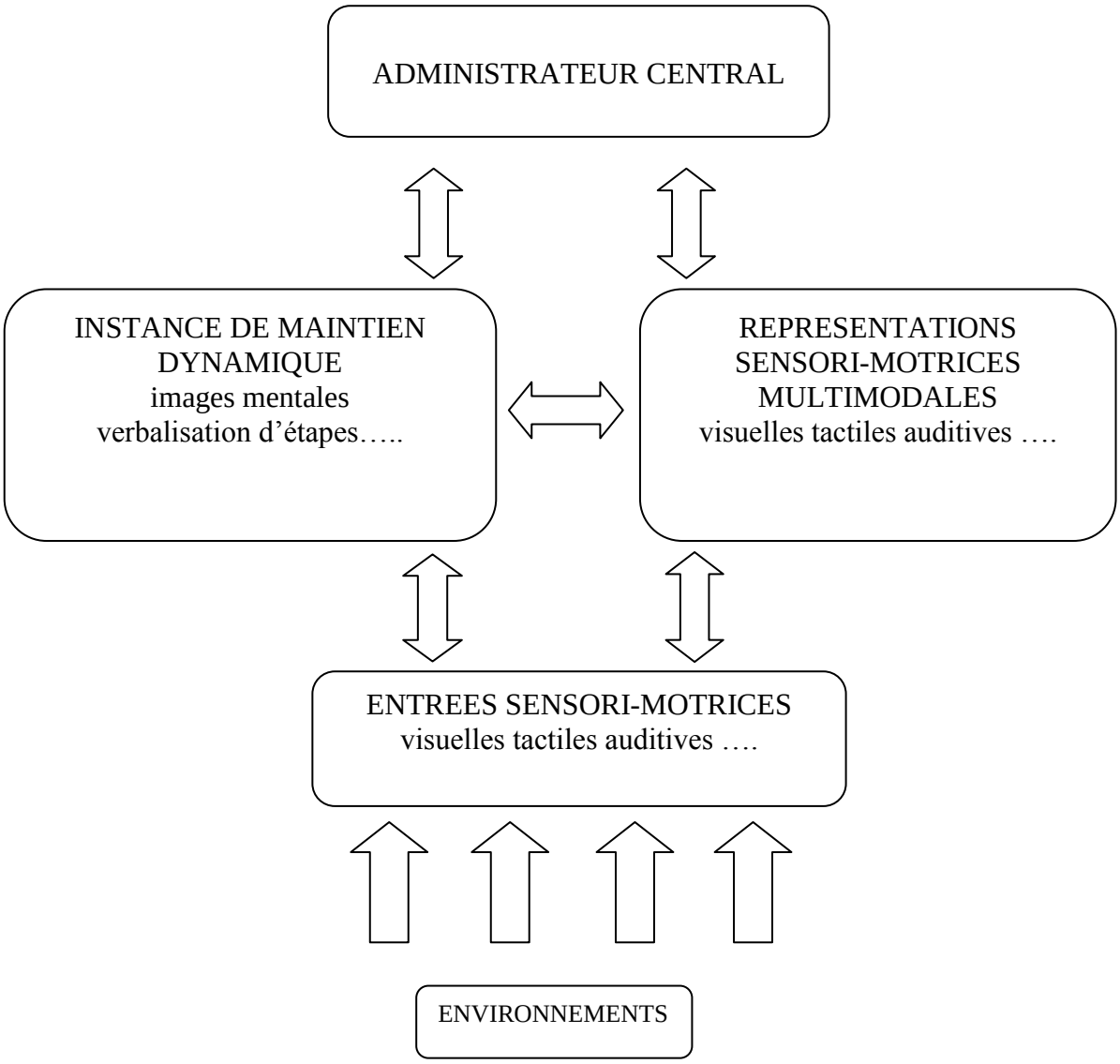


***Figure 29*: Modèle de la mémoire de travail révisé (Boumenir, 2011) qui tient compte du traitement multi-sensoriel temporaire d'informations, dans des tâches de nature spatiale aussi bien que dans d'autres tâches cognitives. Ce modèle est inspiré du modèle de Baddeley (2003).**

VI. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES----------

Devant l'évolution surprenante des environnements réels liée aux nouvelles constructions architecturales ou aux nouveaux éléments fonctionnels rajoutés aux espaces, qui deviennent ainsi de plus en plus complexes voir encombrants et en particulier l'espace urbain à moyenne ou grande échelle, chercheurs et concepteurs se sont intéressés aux systèmes internes et/ou externes interactifs pouvant aider à mieux comprendre ces environnements, à les rendre plus lisibles. Les systèmes cognitifs internes, à savoir les fonctions multiples du cerveau humain, assure le traitement des informations issues d'environnements divers et le maintien de celles-ci sous formes de représentations mentales stables. Les systèmes externes, à savoir les nouvelles technologies pour aider l'homme à contrôler son environnement, ont besoin d'être confrontés à nos connaissances relatives aux premiers pour être validés. Dans cette thèse nous avons voulu apporter des précisions sur la nature des interactions entre l'homme et son environnement semi-naturel et/ou urbain au travers d'interactions homme-outils, visuelles ou tactiles, ainsi que leur impact sur le traitement cognitif d'informations spatiales.

Contribution relative en fonction du contexte

Dans nos expériences, les représentations visuelles en plans 2D ou virtuelles semblaient comporter des lacunes et de ce fait empêcher les navigateurs de retrouver leurs chemins de façon efficace. Dans cette thèse, nous avons apporté des réponses fondamentales qui pourront aider la compréhension des mécanismes cognitifs de structuration mentale des espaces physiques, au moyen des fonctions complexes de la mémoire de travail. Cette dernière paraît bien moins limitée en capacité de traitement et de stockage que l'on avait pensé. En effet, il semblerait que des encodages à dimensions multiples sont réalisés par des mécanismes interactifs et massivement parallèles déjà aux niveaux les plus élémentaires de traitement des entrées sensorielles. Il ressort de nos expériences que les connaissances acquises en condition plan 2D, visuel ou tactile, étaient relativement efficaces pour permettre aux participants voyants ou atteints d'une déficience visuelle de retrouver leur chemin. Cependant, certaines personnes avaient plus de difficultés que d'autres et se sont retrouvées désorientées, surtout les femmes dans l'expérience 1. Cette difficulté a été liée à la complexité du parcours, d'une part, mais surtout au fait que les femmes ont tendance à utiliser beaucoup plus les repères que la géométrie des routes que les hommes, ce qui leur rend la transformation mentale, ou la mise en relation d'une structure visuelle 2D à la réalité 3D plus difficile. Dans nos

expériences, le stress subjectif semble être plus élevé chez les femmes en situation de familiarisation par cartes géométriques, ce qui corrobore les résultats de certains travaux sur les différences entre sexes tels que ceux de Silvermann & Phillips (1993), où les auteurs avaient montré un effet du cycle menstruel sur les performances de navigation. Les travaux de Driscoll *et al* (2005) complémentent ces observations par le constat que la testostérone était un facteur déterminant, possiblement d'ordre motivationnel, du succès relatif de la navigation chez l'homme. En environnement *Google Street View* (expérience 2), les cartes 2D étaient toujours orientées ver le Nord et statiques. Comme certaines personnes semblent avoir du mal à réaliser une rotation mentale d'un tel plan (Klippel, Freksa, & Winter, 2006; Levine, Jankovic, & Hanley, 1982; Rossano & Warren, 1989), ou n'arrivent pas à se positionner par rapport aux points cardinaux, il serait utile de rajouter des options dans *Google Map*, par exemple, qui rendraient possible la rotation de la carte 2D en fonction du point de vue désiré par l'utilisateur. Dans certaines conditions où le rendu virtuel d'un environnement semi-naturel complexe est enrichi par des repères artificiels multiples (expérience 1), la connaissance primordiale des distances relatives entre ces repères n'est pas respectée. Cette observation soulève un problème important à prendre en compte dans la conception de systèmes de navigation sur la base de vues d'écran et dans la programmation sensori-motrice de robots mobiles.

L'exploitation des résultats de l'expérience 3 nous a permis de mettre en relief l'importance des interactions multi-sensorielles chez l'homme privé de vision. Les frontières entre modalités sensorielles ne sont certainement pas imperméables et un recrutement d'aires corticales visuelles chez les aveugles peut se faire sur la base d'informations auditives, par exemple (Weeks *et al*, 2000; Arno *et al*, 2001; Rauschecker, 2001). Ainsi, lorsqu'une modalité est indisponible, d'autres modalités sensorielles prennent le relais et occupent des territoires initialement dévolus à la modalité manquante en vue d'une compensation. Les personnes à qui nous avions bandés les yeux dans l'expérience 3 étaient ainsi parfaitement capables, comme les aveugles de naissances ou tardifs, à retrouver leur chemin après une expérience directe ou par l'intermédiaire d'indications verbales. Les difficultés n'étaient pas autant liées aux conditions de l'expérience proprement dites, mais plutôt à l'aménagement particulier de l'environnement même. Il serait, dans ce contexte, utile de proposer des balises sonores pour indiquer les passages piétons et les emplacements des stations de transports en communs aux déficients visuels.

La mémoire de travail de l'homme ne semble pas avoir une capacité limitée au traitement sériel des informations et au stockage temporaire d'un nombre restreint d'items. Dans nos

expériences, les sujets n'avaient que très peu de temps, quelques minutes seulement, pour se familiariser avec des itinéraires à géométrie complexe, au moyen d'outils qui véhiculaient parfois une multitude d'informations en une seule prise de vue, comme *Google Street View*, par exemple. Les performances des sujets, compte tenu de ce facteur de complexité, étaient souvent surprenantes, les stratégies exploitées au cours de la tâche étaient multiples. Indiscutablement, en navigation de mémoire sur la base d'une très brève familiarisation avec un milieu urbain complexe et à grande échelle, la mémoire de travail de l'homme met en jeu des traitements sensoriels et symboliques massivement parallèles et, sans aucun doute, des interactions complexes avec la mémoire à long terme. Selon les travaux de Courtney *et al* (1998) la mémoire de travail serait avant tout un processus de maintien d'une représentation active de l'information spatiale au moyen d'interactions avec des processus mentaux d'ordre supérieur, impliquant une aire d'encodage à long terme située dans le sillon frontal supérieur. Les études de Mast *et al* (1999) et de Galati *et al* (2000) avaient aussi identifié des processus de haut niveau (« *top down* ») dans l'orientation spatiale de l'homme en observant qu'un cadre de référence égocentrique activait un réseau bien spécifique de neurones fronto-pariétaux. Dans ce réseau était identifié un sous-ensemble fonctionnel, sélectivement activé par un cadre de référence lié à l'objet.

Des études de plus en plus ciblées des processus mentaux qui permettent à l'homme, en développement continu, de dépasser les limites préjugées de ses capacités cognitives, à court, à moyen et à long terme, représentent clairement l'un des défis les plus intéressants dans les futures recherches en sciences cognitives. La stratégie mentale qui semble avoir été la plus utilisée après familiarisation au moyen d'une expérience directe avec les lieux se décrit en termes d'opérations de séquençage des routes et semble être basée sur une représentation égocentrique de l'espace. Les stratégies globales basées sur une représentation allocentrique de l'espace, médiatisées d'avantage par des images mentales, comme les résultats obtenus ici tendent à suggérer, sont privilégiées après familiarisation au moyen d'un plan 2D visuel ou tactile ou d'indications verbales. Il est probable qu'il s'agisse de traitements de nature différente, impliquant des régions corticales fonctionnellement distincts (Janzen *et al*, 2007).

L'exploitation de telles stratégies types relatives aux repères, aux routes et à leur configuration globale pourrait aider à la conception de robots mobiles indépendants utiles aux handicapés moteurs et personnes âgées qui ont des difficultés à se déplacer. Pour ce qui concerne les systèmes d'aide aux malvoyants, il serait nécessaire de mettre l'accent sur la luminosité relative et les couleurs des repères, car beaucoup d'handicapés visuels perçoivent bien les contrastes et les couleurs en milieu naturel. L'ouïe semble être la modalité sensorielle

la plus utilisée pour compenser l'absence de vision. Une expérience sur les marins non-voyants avait montré que le retour auditif des bouées fournissait un lien important entre le monde physique et l'abstraction mentale d'un parcours et que le son offrait aux sujets un pouvoir d'agir de façon contrôlée sur ce parcours (Lenay, 2005).

VII. REFERENCES----------

Allen, G. L. (1997). From knowledge to words to wayfinding: Issues in the production and comprehension of route directions. Dans S. C. Hirtle (Éd.), *Spatial information theorv: A theoretical basis for GIS. Lecture Notes in Computer Science, 1329*, 363-372. Berlin: Springer-Verlag.

Allen, M. J., & Hogeland, R. (1978). Spatial problem-solving strategies as functions of sex. *Perceptual and Motor Skills*, *47*, 348-350.

Amedi, A., Raz, N., Pianka, P., Malach, R., & Zohary, E. (2003). Early'visual'cortex activation correlates with superior verbal memory performance in the blind. *Nature Neuroscience*, *6*(7), 758–766.

Andersen, R. A., Snyder, L. H., Li, C. S., Stricanne, B. (1993). Coordinate transformations in the representation of spatial information. *Curr Opin Neurobiol*, *3*, 171-176.

Anderson, J. R. (1983). A spreading activation theory of memory. *Journal of verbal learning and verbal behavior*, *22*(3), 261–295.

Appleyard, D. (1969). Why buildings are known: A predictive tool for architects and planners. *Environment & Behavior*, *1*, 131-156.

Appleyard, D. (1970). Styles and methods of structuring a city. *Environment and Behaviour*, *2*, 101-117.

Arno, P., De Volder, A. G., Vanlierde, A., Wanet-Defalque, M. C., Streel, E., Robert, A., Sanabria-Bohórquez, S., et al. (2001). Occipital activation by pattern recognition in the early blind using auditory substitution for vision. *Neuroimage*, *13*(4), 632–645.

Arthur, E. J., Hancock, P. A., & Chrysler, S. T. (1997). The perception of spatial layout in real and virtual worlds. *Ergonomics*, *40*(1), 69–77.

Arthur, P., Passini, R. (1992). Wayfinding: People, Signs, and Architecture. *McGraw-Hill Ryerson*. Toronto.

Atkinson, R. C., & Shiffrin, R.M. (1968). Human memory: A proposed system and its control process. Dans W. K. Spence (Éd.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (p. 85-195). New York: Academic Press.

Bach-y-Rita, P., Collins, C. C., Saunders, F. A., White, B. & Scadden, L. (1969). Vision substitution by tactile image projection. *Nature*, *221*, 963-964.

Baddeley, A. (1986). Working memory. London: Oxford University Press.

Baddeley, A. (1992). Working memory. *Science*, 255(5044), 556-559.

Baddeley, A. (1996). Exploring the central executive. *Quaterly Journal of Experimental Psychology*, *49A*, 5-28.

Baddeley, A. D. (1974). Working memory. *Recent Advances in Learning and Motivation*, *8*, 47-89.

Baddeley, A. D. (1990). Humain Memory: Theory and practice. *Allyn & Bacon*.

Baddeley, A. D. H. (2003). Working memory: Looking back and looking forward. *Nature Neuroscience*, *4*, 829-839.

Baddeley, A. D., & Logie, R. H. (1999). Working memory: The multiple component model. Dans A. Miyake (Éd.), *Models of working memory* (p. 28-61). New York: Cambridge University Press.

Baddeley, A.D. & Logie,R.H. (1999) Working memory: The multiple component model. In A. Miyake & P. Shah (Eds.) *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 28-61). New York: Cambridge University Press.

Bahrick, L. E. (1983). Infants perception of substance and temporal synchrony in multimodal events. *Infant Behavior and Development*, *6*(4), 429–451.

Baird, J. C., Hubbard, T. L. (1992). Psychophysics of Visual Imagery. *Advances in psychology*, *92*, 389–440.

Baird, J. C., Wagner, M., & Noma, E. (1982). Impossible cognitive spaces. *Geographical Analysis*, *14*(3), 204–216.

Baker, R. (1981). *Human navigation and the sixth sense*. Simon and Schuster, New York.

Barbéris, J. M. Manes-Gallo, M. C. (2007). Parcours dans la ville: Descriptions d'itinéraires piétons. Paris: L'Harmattan.

Barkowsky, T., & Freksa, C. (1997). Cognitive requirements on making and interpreting maps. *Spatial informationTheory: a theoretical basis for GIS* , 347-361.

Bartolomeo, P., Bachoud-Lévi, A. C., De Gelder, B., Denes, G., Barba, G. D., Brugières, P., & Degos, J. D. (1998). Multiple-domain dissociation between impaired visual perception and preserved mental imagery in a patient with bilateral extrastriate lesions. *Neuropsychologia*, *36*(3), 239–249.

Bateson, G. (1972). *Steps to an ecology of mind: Collected essays in anthropology, psychiatry, evolution, and epistemology.* Jason Aronson.

Bavelier, D., & Neville, H. J. (2002). Cross-modal plasticity: where and how? *Nature Reviews Neuroscience*, *3*(6), 443–452.

Beritoff, J. S. (1965). *Neural mechanisms of higher vertebrate behavior* (W. T. Liberson.). Boston: Little, Brown.

Berthoz, A. (1991). Reference frames for the perception and control of movement. Dans J. Paillard (Ed). *Brain and space*, (pp. 81-111). New York, NY, US: Oxford University Press, xi, 499 pp.

Berthoz, A., & Viaud-Delmon, I. (1999). Multisensory integration in spatial orientation. *Current Opinion in Neurobiology*, *9*, 708-12.

Boisacq-Schepens, N., Crommelinck, M. (2000). Neurosciences. Paris : Dunod.

Böök, A. Gärling, T. (1980). Processing of information about location during locomotion: effects of amount of visual information about the locomotor patterns. *Percept Mot Skills*, *51*(1), 231-8.

Böök, A. Gärling, T. (1981). Maintenance of orientation during locomotion in unfamiliar environments. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, *7*(5), 995-1006.

Boumenir, Y., Georges, F., Valentin, J., Rebillard, G., Dresp-Langley, B. (2010). Wayfinding in an unfamiliar environment. *Perceptual & Motor Skills*, *111*, 829-847.

Boumenir, Y., J., Rebillard, G., Dresp-Langley, B. (2011). Perception (ECVP), *sous presse*.

Bovy, P. H. L., & Stern, E. (1990). *Route choice: wayfinding in transport networks*. Kluwer Academic Publishers.

Brambring, M., & Weber, C. (1981). Taktile, verbale und motorische Informationen zur geographischen Orientierung Blinder (Tactile, verbal, and motoric informations for the orientation of the blind). *Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie*, *28*, 23-37.

Brown, R. (1958). Words and things. New York, NY, US: Free Press.

Bryant, D. J., & Tversky, B. (1991). Locating objects from memory or from sight. *32nd annual meeting of the Psychonomic Society, San Francisco, CA.[DJB]*.

Bryant, K. J. (1982). Personality correlates of sense of direction and geographic orientation. *Journal of Personality and Social Psychology*, *43*(6), 1318.

Burton, H. (2003). Visual cortex activity in early and late blind people. *The Journal of neuroscience*, *23*(10), 4005.

Burton, H., Snyder, A. Z., Conturo, T. E., Akbudak, E., Ollinger, J. M., & Raichle, M. E. (2002). Adaptive changes in early and late blind: a fMRI study of Braille reading. *Journal of Neurophysiology*, *87*(1), 589.

Buttenfield, B. P. (1986). Comparing distortion on sketch maps and MDS configurations. *The Professional Geographer*, *38*(3), 238–246.

Cadwallader, M. T. (1977). Frame Dependence in Cognitive Maps: An Analysis Using directional Statistics. *Geographical Analysis*, *9*, 284-291.

Cadwallader, M. T. (1979). Problems in cognitive distance: Implications for cognitive mapping. *Environment & Behavior*, *11*, 559-576.

Casey, S. M. (1978). Cognitive mapping by the blind. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, *72*(8), 297-301

Cornell, E. H., Heth, C. D., & Rowat, W. L. (1992). Wayfinding by children and adults: Response to instructions to use look-back and retrace strategies. *Developmental Psychology*, *28*(2), 328.

Cornell, E. H., Sorenson, A., & Mio, T. (2003). Human sense of direction and wayfinding. *Annals of the association of American Geographers*, *93*(2), 399–425.

Cornoldi, C., Vecchi,T. (2000). Mental imagery in blind people: the role of passive and active visuo-spatial processes. *M. Heller, Editor, Touch, representation, and blindness* (p. 143-181.). Oxford: Oxford University Press.

Couclelis, H. (1996). Verbal Directions for Way-Finding: Space, Cognition, and Language. Dans Portugali, J. (Ed.), *The Construction of Cognitive Maps* (pp. 133-153). Kluwer, Dordrecht.

Couclelis, H., Golledge, R. G., Gale, N., & Tobler, W. (1987). Exploring the anchor-point hypothesis of spatial cognition*. *Journal of Environmental Psychology*, *7*(2), 99–122.

Courtney, S. M., Petit, L., Maisog, J. M., Ungerleider, L. G., & Haxby, J. V. (1998). An area specialized for spatial working memory in human frontal cortex. *Science*, *279*, 1347-1351.

D'angiulli, A., & Kennedy, J. M. (2001). Children's tactual exploration and copying without

vision. *International Journal of Rehabilitation Research*, *24*(3), 233.

D'Angiulli, A., & Maggi, S. (2003). Development of drawing abilities in a distinct population: Depiction of perceptual principles by three children with congenital total blindness. *International Journal of Behavioral Development*, *27*(3), 193.

Darken, R. P. (1996). Navigating large virtual spaces. *International Journal of Humain-Computer Interaction*, *8*(1), 49-71.

Darken, R. P., & Peterson, B. (2001). Spatial orientation, wayfinding, and representation. Dans Stanney, K. (Ed). *Handbook of virtual environment technology* (pp. 1–22).

De Volder, A. G., Bol, A., Blin, J., Robert, A., Arno, P., Grandin, C., Michel, C., et al. (1997). Brain energy metabolism in early blind subjects: neural activity in the visual cortex. *Brain research*, *750*(1-2), 235–244.

De Volder, A. G., Catalan-Ahumada, M., Robert, A., Bol, A., Labar, D., Coppens, A., Michel, C., et al. (1999). Changes in occipital cortex activity in early blind humans using a sensory substitution device. *Brain research*, *826*(1), 128–134.

Denis, M. (1989). Image et Cognition. *Presse Universitaire de France*. Paris.

Denis, M. (1996). Language and spatial cognition. *Paper presented at ENP School Conference on the Representation of Space*. San Feliu, Spain.

Denis, M., & Loomis, J. M. (Eds.) (1997). The description of routes: a cognitive approach to the production of spatial discourse. *Current Psychology of Cognition*, *16*(4), 409-458.

Denis, M., & Loomis, J. M. (Eds.) (2007). Human spatial cognition: Memory, navigation, and environmental learning. *Psychological Research*, *71*, 235-239.

Denis, M., Pazzaglia, F., Cornoldi, C., & Bertolo, L. (1999). Spatial discourse and navigation: An analysis of route directions in the city of Venice. *Applied Cognitive Psychology*, *13*, 145-174.

Devlin, A. S., & Bernstein, J. (1995). Interactive wayfinding: Use of cues by men and

women. *Journal of Environmental Psychology*, *15*(1), 23–38.

Dodds, A. G., Howarth, C.I. & Carter, D.C. (1982). The mental maps of the blind: the role of previous experience. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, *76*, 5-12.

Downs, R. M., & Stea, D. (1973). Cognitive maps and spatial behaviour. Process and products. Dans R. M. Downs (Éd.), *Image and environment: Cognitive mapping and spatial behaviour* (pp. 8-26). Chicago: Aldine.

Driscoll, I., Hamilton, D. A., Yeo, R. A., Brooks, W. M., & Sutherland, R. J. (2005). Virtual navigation in humans: the impact of age, sex, and hormones on place learning. *Hormones and Behavior*, *47*(3), 326–335.

Dumont, A. (1988). L'orthophoniste et l'enfant sourd. *Masson*. Paris.

Dumont, A. (1995). L'orthophoniste et l'enfant sourd. Paris.: Masson.

Durlach, N. I., Mavor, A. S. (1995). *Virtual Reality: Scientific and Technological Challenges* (pp. 32-33). USA.: National Academy Press.

Ehrich, V., & Koster, C. (1983). Discourse organization and sentence form: The structure of room descriptions in Dutch. *Discourse Processes*, *6*(2), 169–195.

Ehrlich, M. F., & Delafoy, M. (1990). La mémoire de travail: structure, fonctionnement, capacité. *L'année Psychologique*, *90*(3), 403–427.

Ellis, S. R. (1991). Nature and origins of virtual environments: A bibliographical essay. *Computing Systems in Engineering*, *2*(4), 321–347.

Espinosa, A., Ungar, S., Ochaita, E., Blades, M. & Spencer, C. (1998). Comparing methods for introducing blind and visually impaired people to unfamiliar urban environments. *Journal of Environmental Psychology*, *18* (3), 277-287.

Evans, G. W., & Pezdek, K. (1980). Cognitive mapping: knowledge of real-world distance and location information. *Journal of Experimental Psychology-Human Learning and Memory*, *6*(1), 13-24.

Evans, G. W., Skorpanich, M. A., Garling, T., Bryant, K. J., & Bresolin, B. (1984). The effects of pathway configuration, landmarks and stress on environmental cognition. *Journal of environmental psychology*, *4*(4), 323–335.

Fletcher, J. F. (1980). Spatial representation in blind children 1: development compared to sighted children. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, *74*(10), 318-385.

Fontaine, S., Denis, M. (1999). The production of route instructions in underground and urban environments. Dans C. Freksa (Éd.), *Spatial Information Theory: Cognitive and Computational Foundations of Geographic Information Science. Proceedings of the International Conference COSIT'99 Stade. Germany, August (83-94)*. Berlin: Springer Verlag.

Forgus, R. H. (1966). *Perception: The Basic Process in Cognitive Development*. United States of America.

Franklin, N., & Tversky, B. (1990). Searching imagined environments. *Journal of Experimental Psychology-Human Learning and Memory: General*, *119*, 63-76.

Freundschuh, S. M., & Egenhofer, M. J. (1997). Human conceptions of spaces: Implications for geographic information systems. *Transactions in GIS*, *2*(4), 361–375.

Frick, R. W. (1988). Issues of representation and limited capacity in the visuospatial sketchpad. *British Journal of Psychology*, *79*(3), 289–308.

Galati, G., Lobel, E., Vallar, G., Berthoz, A., Pizzamiglio, L. & Le Bihan, D. (2000). The neural basis of egocentric and allocentric coding of space in humans: a functional magnetic resonance study. *Exper. Brain Res*, *133*, 156-164.

Gale, N. D., Golledge, R. G., Halperin, W. C., & Couclelis, H. (1990). Exploring spatial familiarity. The Professional Geographer, *42*(3), 299-313.

Galea, L. A. M., Kimura, D. (1993). Sex differences in route learning. *Personality and Individual differences*, *14*, 53-65.

Gaonac'h, D., Larigauderie, P. (2000). Mémoire et fonctionnement cognitif: la mémoire de travail. Paris: Armand Colin.

Gärling, T., Böök, A., & Lindberg, E. (1984). Cognitive mapping of large-scale environment: The interrelationship of action plans, acquisition, and orientation. *Environment and behavior*, *16*, 3-34.

Gärling, T., Böök, A., Ergezen, N. (1982). Memory for the spatial layout of the everyday physical environment: differential rates of acquisition of different types of information. *Scand J Psychol*, *23*(1), 23-35.

Gärling, T., Golledge, R. G. (1989). Environmental perception and cognition. Dans E. H. Zube (Éd.), *Advances in environment, behavior, and design* (pp. 203-236). New York: Plenum Press.

Gärling, T., Lindberg, E., Carreiras, M., Böök, A. (1986b). Reference systems in cognitive maps. *Journal of Environmental Psychology*, *6*, 1-18.

Gathercole, S. E., & Baddeley, A. D. (1993). *Working memory and language*. Psychology Press.

Gentaz, E., & Hatwell, Y. (1996). Role of gravitational cues in the haptic perception of orientation. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *58*(8), 1278–1292.

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

Gibson, J. J. C., & Carmichael, L. (1950). *The perception of the visual world*. Boston : Houghton Mifflin.

Giudice, N. A., Bakdash, J. Z., & Legge, G. E. (2007). Wayfinding with words: spatial learning and navigation using dynamically updated verbal descriptions. *Psychological research*, *71*(3), 347–358.

Giudice, N. A., Bakdash, J. Z., & Legge, G. E. (2007). Wayfinding with words: spatial learning and navigation using dynamically updated verbal descriptions. *Psychological*

research, *71*(3), 347–358.

Glasauer, S., Amorim, M. A., Vitte, E., & Berthoz, A. (1994). Goal-directed linear locomotion in normal and labyrinthine-defective subjects. *Experimental Brain Research*, *98*(2), 323–335.

Gluck, M. (1991). Making sense of human wayfinding: review of cognitive and linguistic knowledge for personal navigation with a new research direction. Dans D. M. Mark and A. U. Frank (Ed.). *Cognitive and linguistic aspects of geographic space* (pp. 117–135). Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.

Goldenberg, G. (1998). Is there a common substrate for visual recognition and visual imagery? *Neurocase*, *4*(2), 141–147.

Golledge, R. G. (1987). Environmental cognition. Dans D. Stokols (Éd.), *Handbook of Environmental Psychology* (pp. 131-174). New York: John Wiley and Sons.

Golledge, R. G. (1992). Place recognition and wayfinding: Making sense of space. *Geoforum*, *23*(2), 199-214.

Golledge, R. G. (1999). Wayfinding behavior: cognitive mapping and other spatial processes. Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Golledge, R. G., Klatzky, R. L., & Loomis, J. M. (1996). Cognitive mapping and wayfinding by adults without vision. Dans J. Portugali (Éd.), *The Construction of Cognitive Maps* (pp. 215-246). Dordrecht: The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Golledge, R. G., Ruggles, A. J., Pellegrino, J. W., & Gale, N. D. (1993). Integrating route knowledge in an unfamiliar neighborhood: Along and across route experiments. *Journal of Environmental Psychology*, *13*(4), 293-307.

Gougoux, F., Zatorre, R. J., Lassonde, M., Voss, P., & Lepore, F. (2005). A functional neuroimaging study of sound localization: visual cortex activity predicts performance in early-blind individuals. *PLoS biology*, *3*(2), e27.

Hamilton, R. H., & Pascual-Leone, A. (1998). Cortical plasticity associated with Braille learning. *Trends in Cognitive Sciences*, *2*(5), 168–174.

Hatwell, Y. (1966). Privation sensorielle et intelligence. Effets de la cécité précoce sur la genèse des structures logiques de l'intelligence. *Conséquences de la cécité précoce sur le développement de l'intelligence.* (pp. 232). Paris: PUF.

Hatwell, Y. (1986). Toucher l'espace. La main et la perception tactile de l'espace (pp. 374). Lille: PUL.

Hatwell, Y. (2003a). Manual exploratory procedures in children and adults. Dans Y.Hatwell, A. Streri & E. Gentaz (Eds.), *Touching for knowing. Cognitive psychology of haptic manual perception* (pp. 67-82). Amsterdam & Philadelphia: John Benjamin Publishers.

Hatwell, Y. (2003b). *Touching for knowing: cognitive psychology of haptic manual perception*. John Benjamins Publishing Company.

Hatwell, Y. I. (2000). Les procédures d'exploration haptique chez l'enfant et l'adulte. Dans Y. Hatwell (Éd.), *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle*. Paris: PUF.

Hebb, D. O. (1949). *The Organization of behavior*. New York: Wiley.

Heft, H. (1983). Way-finding as the perception of information over time. *Population & Environment*, *6*(3), 133–150.

Herbelin, B., Benzaki, P., Riquier, F., Renault, O., Grillon, H., & Thalmann, D. (2005). Using physiological measures for emotional assessment: a computer-aided tool for cognitive and behavioural therapy. *International Journal On Disability And Human Development*, *4*(4), 269.

Hill, E. W., Rieser, J. J., Hill, M. M., Hill, M., & others. (1993). How persons with visual impairments explore novel spaces: Strategies of good and poor performers. *Journal of*

visual impairment & blindness. *87*, 295-301.

Hill, K. A. (1999). The psychology of lost. Dans K. Hill (Ed.). *Lost person behavior* (pp. 1–15). Ottawa, Ontario: National Search and Rescue Secretariat.

Holding, C. S., & Holding, D. H. (1989). Acquisition of route network knowledge by males and females. *The Journal of General Psychology*, *116*(1), 29–41.

Honoré, J., Richard, C., & Mars, F. (2002). Perception de l'image du corps et action. (Y. Coello, Éd.). Solal.

Hurtle, S., Sorrows, M. (2006). *Applied Spatial Cognition: From Reseach to Cognitive Technology, Chapter Navigation in Electronic Environments*. Psychology press,.

Ishikawaa, T., Fujiwarab, H., Osamu-Imaic, O., Okaboc, A (2008). Wayfinding with a GPS-based mobile navigation system: A comparison with maps and direct experience. *Journal of Environmental Psychology*, *28(1)*, 74-82.

Jacob, P. (1985). Voit-on ce que l'on croit? *Philosophie*, *7*, 53-72.

Janzen G., Jansen, C., & van Turennout, M. (2007). Memory consolidation of landmarks in good navigators. *Hippocampus*, *18*(1), 40-47.

Johanson, G. (1950). *Configurations in event perception*. Uppsala, Sweeden: Almqvist & Wiskell.

Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *14*(2), 201–211.

Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1992). A capacity theory of comprehension: Individual differences in working memory. *Psychological review*, *99*(1), 122.

Kalakoski, V., & Saariluoma, P. (2001). Taxi drivers' exceptional memory of street names. *Memory & cognition*, *29*(4), 634.

Kitchin, R. F., & Freundschuh, S. (Eds.). (2003). *Cognitive mapping: past, present, and future*. London: Routledge.

Kitchin, R. M., & Jacobson, R. D. (1997). Techniques to collect and analyze the cognitive map knowledge of persons with visual impairment or blindness: Issues of validity. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, *91*(4), 360–376.

Kitchin, R., & Freundschuh, S. (2000). *Cognitive mapping: Past, present, and future*. Psychology Press.

Klatzky, R. L., Colledge, R. G., Loomis, J. M., Cicinelli, J. G., & others. (1995). Performance of blind and sighted persons on spatial tasks. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, *89*, 70-82.

Klein, M., & Traunmuller, R. (1993). Architecture and user interface of KB-DSS development environment. *System Sciences, 1993, Proceeding of the Twenty-Sixth Hawaii International Conference*, *3*,108–118.

Klippel, A., Winter, S. (2005). Structural salience of landmarks for route directions. (A. G. Cohn, Éd.). Springer.

Klippel, A., Freksa, C., & Winter, S. (2006). You-are-here maps in emergencies–The danger of getting lost. *Journal of spatial science*, *51*(1), 117–131.

Kosslyn, S. M. (1980). *Image and mind*. Harvard Univ Press.

Kosslyn, S. M. (1994b). Image and brain: The resolution of the imagery debate. *MIT PRess*. Cambridge, MA.

Kozlowski, L. T., & Cutting, J. E. (1978). Recognizing the gender of walkers from point-lights mounted on ankles: Some second thoughts. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *23*(5), 459–459.

Kuipers, B. (1982). The « map in the head » metaphor. *Environment and Behavior*, *14*(2), 202-220.

Kuipers, B., Tecuci, D., & Stankiewicz, B. J. (2003). The skeleton in the cognitive map. A computational and empirical exploration. *Environment and Behavior*, *35*, 81-106.

Kupers, R., Chebat, D. R., Madsen, K. H., Paulson, O. B., & Ptito, M. (2010). Neural correlates of virtual route recognition in congenital blindness. *Proceedings of the National Academy of Science*, *107*, 12716-12721.

Lacour, M., Gustave Dit Duflo, S. (1999). Les noyaux vestibulaires: premier relais vestibulaire ou centre prémoteur et préperceptif d'intégration d'informations spatiales? Dans Y. Christen (Éd.), *Rencontres IPSEN en ORL* (pp. 89-101). Paris: Irvinn.

Lahav, O., & Mioduser, D. (2004). Exploration of unknown spaces by people who are blind using a multi-sensory virtual environment. *Journal of Special Education Technology*, *19*, 15–24.

Lalande, A. (1956). *Vocabulaire tedmique et critique de la philosophie*. Paris.

Lawton, C. A. (1994). Gender differences in way-finding strategies: Relationship to spatial ability and spatial anxiety. *Sex Roles*, *30*, 765-779.

Lawton, C. A. (1996). « Individual - and gender - Related Differences in Indoor Wayfinding ». *Environment and Behavior*, *28*(2), 204-219.

Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1987). Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive psychology*, *19*(3), 342–368.

Lederman, S. J., Klatzky, R. L., & Barber, P. O. (1985). Spatial and movement-based heuristics for encoding pattern information through touch. *Journal of experimental psychology: General*, *114*(1), 33.

Lederman, S. J., Klatzky, R. L., & Reed, C. L. (1993). Constraints on haptic integration of spatially shared object dimensions. *PerceptionLondon*, *22*(6), 723–743.

Lenay, C. (2005). Design of a tactil prothesis for blind users with a virtual reality system,. *Actes du colloque «Le virtuel et le tangible: ce qui résiste»*. Université Technologique de Compiègne.

Lever, C., Wills, T., Cacucci, F., Burgess, N., & O'Keefe, J. (2002). Long-term plasticity in hippocampal place-cell representation of environmental geometry. *Nature*, *416*(6876), 90–94.

Levine, D. N., Warach, J., & Farah, M. (1985). Two visual systems in mental imagery. *Neurology*, *35*(7), 1010.

Levine, M. (1982). You-are-here maps. *Environment and Behavior*, *14*(2), 221.

Levinson, S. C. (1997). Language and cognition: The cognitive consequences of spatial description in Guugu Yimithirr. *Journal of Linguistic Anthropology*, *7*(1), 98–131.

Liben, L. S. (1981). Spatial representation and behaviour: multiple perspectives. Dans L. S. Liben (Éd.), *Spatial Representation and Behaviour Across the Lifespan: Theory and Application*. New York: Academic Press.

Liben, L. S. (2001). *Thinking through maps*. Cambridge: MIT Press, Spatial schemas and abstract thought.

Lieblich, I., & Arbib, M. A. (1982). Multiple representations of space underlying behavior. *Behavioral and Brain Sciences*, *5*(04), 627–640.

Lindberg, E., & G\ärling, T. (1981). Acquisition of locational information about reference points during locomotion with and without a concurrent task: Effects of number of reference points. *Scandinavian Journal of Psychology*, *22*(1), 109–115.

Linn, M. C., & Petersen, A. C. (1985). Emergence and characterization of sex differences in spatial ability: *a metaanalysis: Child Development*, *56*(6), 1479-1498.

Lloyd, R., & Heivly, C. (1987). Systematic Distortions in Urban Cognitive Maps. *Annals of the Association of American Geographers*, *77*(2), 191-207.

Lloyd, R., Cammack, R., & Holliday, W. (1996). Learning environment and switching perspectives. *Cartographica*, April, 5-17.

Locke, J. (1959). An essay concerning human understanding. Book II, Chapter X, 1-2. Dans A. E. Campbell Fraser (Éd.). New York: Dover (original work published 1690).

Logie, R. H., Marchetti, C. (1991). Visuo-spatial working memory: Visual, spatial or central executive? Dans R. H. Logie (Éd.), *Mental images in human cognition* (pp. 105-115). Amsterdam: Elsevier.

Logie, R. H. (1995). Visual working memory. *Lawrence Erlbaum Associates., Hillsdale, NJ.*

Logie, R. H. (1996). The seven ages of working memory. Dans J. T. E. Richardson (Éd.), *Working memory and human cognition.* New York: Oxford University Press.

Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Golledge, R. G., Cicinelli, J. G., Pellegrino, J. W., Fry, P. A. (1993). Nonvisual navigation by blind and sighted: assessment of path integration ability. *J Exp Psychol Gen*, *122*(1), 73-91.

Loomis, J. M., Marston, J. R., Golledge, R. G., Klatzky, R. L. (2005). Personal Guidance System for People with Visual Impairment: A Comparison of Spatial Displays for Route Guidance. *J Vis Impair Blind*, *99*(4), 219-232.

Lopez, C., Lacour, M., & Borel, L. (2005). Perception de la verticalité et représentations spatiales dans les aires corticales vestibulaires. Dans M. Lacour, B. Weber *(Eds.), Bipédie, contrôle postural et représentation corticale* (pp. 35–86). Marseille: Solal

Lovelace, K. L., Hegarty,M., &Montello, D. R. (1999). Elements of good route directions in familiar & unfamiliar environments. Dans C. F. D. M. M. (Eds.) (Éd.), *Conference on Spatial Information Theory '99, LNCS 1661* (pp. 37-50). Berlin: Springer.

Lynch, K. (1960). *The Image of the City*. Cambridge: MIT Press.

Ma, Y., & Han, S. (2011). Neural representation of self-concept in sighted and congenitally blind adults. *Brain*, *134*(1), 235.

MacEachren, A. M. (1992). Application of environmental learning theory to spatial knowledge acquisition from maps. *Annals of the Association of American*

Geographers, *82*(2), 245–274.

Mast, F. K., Kosslyn, S. M., Berthoz, A. (1999). Visual mental imagery interferes with allocentric orientation judgements. *NeuroReport*, *10*(17), 3549.

McBurney, D. H., Gaulin, S. J. C., Devineni, T., & Adams, C. (1997). Superior spatial memory of women: Stronger evidence for the gathering hypothesis. *Evolution and Human Behavior*, *18*(3), 165–174.

McGee, M. G. (1979). Human spatial abilities: psychometric studies and environmental, genetic, hormonal, and neurological influences. *Psychological Bulletin*, *86*, 889-918.

McGuiness, D., & Sparks, J. (1983). Cognitive style and cognitive maps: Sex differences in representations of a familiar terrain. *Journal of Mental Imagery*.

McNamara, T. P. S., Shelton, A. L., Shelton, A. L. (2003). Cognitive maps and the hippocampus. *Trends Cogn Sci*, *7*(8), 333-335.

Meilinger, T., Knauff, M., & Bulthoff, H. H. (2008). Working memory in wayfinding - a dual task experiment in a virtual city. *Cognitive Science*, *32*, 755-770.

Michon, P.-E., & Denis, M. (2001). When and why are visual landmarks used in giving directions? Dans D. R. Montello (Éd.), *Spatial information theory: Foundations of geographic information science* (pp. 292-305). Berlin: Springer.

Millar, S. (1994). *Understanding and representing space: Theory and evidence from studies with blind and sighted children*. Oxford University Press, USA.

Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological review*, *63*(2), 81.

Miller, L. (1992). Diderot reconsidered: Visual impairment and auditory compensation. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, *86*(5), 206-210.

Miller, S., Potegal, M., & Abraham, L. (1983). Vestibular involvement in a passive transport and return task. *Physiological Psychology*. *11*, 1-10.

Montello, D. (1992). The geometry of environmental knowledge. Dans A. U. Frank, I. Campari, & U. Formentini (Eds.). *Theories and methods of spatio-temporal reasoning in geographic space* (pp. 136–152). *Lecture Notes in Computer Science 639.* Berlin: Springer-Verlag.

Montello, D. (1993). Scale and multiple psychologies of space. Dans A. U. Frank & I. Campari (Eds.). *Spatial information theory: A theoretical basis for GIS* (pp. 312-321). Lecture Notes in Computer Science 716. Proceedings of COSIT '93. Berlin: Springer-Verlag,

Montello, D. R., Pick, H. L. (1993). « Integrating Knowledge of Vertically-aligned Large-scale Spaces ». *Environment and Behavior*, *25*, 457-484.

Montello, D. R. (1998). A new framework for understanding the acquisition of spatial knowledge in large-scale environments. Dans M. J. Egenhofer & R. G. Golledge (Eds.), *Spatial and temporal reasoning in geographic information systems* (pp. 143-154). New York: Oxford University Press.

Montello, D. R., Lovelace, K. L., Golledge, R. G., and Self, C. M. (1999). Sex-related differences and similarities in geographic and environmental spatial abilities. *Annals of the association of American Geographers*, *89*, 515-34.

Moore, G. T., & Golledge, R. G. (1976). Environmental knowing: Theories, research and methods. Stroudsburg,: PA: Dowden, Hutchinson and Ross.

Morris, N., & Jones, D. M. (1990). Memory updating in working memory: The role of the central executive. *British Journal of Psychology*, *81*(2), 111–121.

Morris, R. G., Garrud, P., Rawlins, J.N., OTKeefe, J. (1982). Place navigation impaired in rats with hippocampal lesions. *Nature*, *297*, 681- 683.

Morris, R. G. M. (1981). Spatial localization does not require the presence of local cues. *Learn. Motiv*, *12*, 239- 260.

Newcombe, N., & Huttenlocher, J. (2000). *Making space: the development of spatial representation and reasoning.* Cambridge: MIT Press.

Niemeyer, W., & Starlinger, I. (1981). Do the blind hear better? Investigations on auditory processing in congenital or early acquired blindness II. Central functions. *International Journal of Audiology*, *20*(6), 510–515.

Noordzij, M. L., Zuidhoek, S., & Postma, A. (2006). The influence of visual experience on the ability to form spatial mental models based on route and survey descriptions. *Cognition*, *100*(2), 321–342.

O'Keefe, J., Nadel, L. (1978). *The hippocampus as a cognitive map*. Oxford, UKOxford University Press.

O'Keefe, J., & Dostrovsky, J. (1971). The hippocampus as a spatial map: Preliminary evidence from unit activity in the freely-moving rat. *Brain research*, 34*(1)*, 171-175.

Ohmi, M. (1996). Egocentric perception through interaction among many sensory systems. *Cognitive Brain Research*, *5*, 87-96.

Paillard, J. (1973). Psychophysiologie du comportement.

Paivio, A. (1978). Comparisons of mental clocks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *4*(1), 61.

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

Pascual-Leone, A., Amedi, A., Fregni, F., & Merabet, L. B. (2005). The plastic human brain cortex. *Annu. Rev. Neurosci.*, *28*, 377–401.

Passini, R. (1984). Spatial representations: a wayfinding perspective. *Journal of Environmental Psychology*, *4*, 153-164.

Passini, R. (1996). Wayfinding design: logic, application and some thoughts on universality. *Design Studies*, *17*(3), 319-331.

Passini, R., & Proulx, G. (1988). Wayfinding without vision. *Environment and Behavior*, *20*(2), 227-252.

Passini, R., Proulx, G., & Rainville, C. (1990). The spatio-cognitive abilities of the visually impaired population. *Environment and Behavior*, *22*(1), 91-118.

Péruch, P., & Lapin, E. A. (1993). Route knowledge in different spatial frames of reference. *Acta Psychologica*, *84*(3), 253–269.

Peterson, L. R., & Peterson, M. J. (1959). Short-term retention of individual verbal items. *Journal of Experimental Psychology-Human Learning and Memory*, *58*, 93-108.

Piaget, J. (1936). *La naissance de l'intelligence de l'enfant*. Neuchatel: Delachaux & Niestlé.

Piaget, J. (1950). *Introduction à l'épistémologie génétiqueLa pensée biologique. La pensée psychologique. La pensée sociologique*.

Piaget, J. (1972). *Introduction à l'épistémologie génétique: La pensée mathématique* (Vol. 2). Paris: P.U.F.

Pick, H. L., & Lockman, J. J. (1981). From frames of reference to spatial representations. Dans L. S., Liben (Ed.). *Spatial representation and behavior across the life span*, (pp. 39–61). New York: Academic Press.

Potegal, M. (1982). Vestibular and neostriatal contributions to spatial orientation. Dans M. E. Portegal (Éd.), *Spatial abilities Development and psychological Fondations* (pp. 361-387). New York: Academic Press.

Poucet, B., Save, E., Lenck-Santini, P. P. (2000). Sensory and memory properties of hippocampal place cells. *Review Neuroscience.*, *11*(2-3), 95-111.

Poucet, B., Alvernhe, A., Hok, V., Renaudineau, S., Sargolini, F., Save, E. (2010). L'hippocampe et le code neural de la mémoire spatiale. *Biologie Aujourd'hui.*, *204*(2), 103-112.

Presson, C. C. (1987). The development of spatial cognition: secondary uses of spatial

information. Dans N. Eisenberg (Éd.), *Contemporary Topics in Developmental Psychology* (pp.77-112). New York: Wiley.

Presson, C. C., & Hazelrigg, M. D. (1984). Building spatial representations through primary and secondary learning. *Journal of experimental psychology: Learning, memory, and cognition*, *10*(4), 716.

Presson, C. C., DeLange, N., & Hazelrigg, M. D. (1989). Orientation specificity in spatial memory: What makes a path different from a map of the path?. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *15*(5), 887.

Prestopnik, J. L., Roskos-Ewoldsen, B. (2000). The relations among wayfinding strategy use, sense of direction, sex, familiarity, and wayfinding ability. *Journal of Environmental Psychology,*, *20*, 177-191.

Pylyshyn, Z. W. (1973). What the mind's eye tells the mind's brain: A critique of mental imagery. *Psychological bulletin*, *80*(1), 1-24.

Pylyshyn, Z. W. (1981). The imagery debate: Analogue media versus tacit knowledge. *Psychological Review*, *88*(1), 16-45.

Rauschecker, J. P. (1995). Developmental plasticity and memory. *Behavioural brain research*, *66*(1-2), 7-12.

Rauschecker, J. P. (2001). Cortical plasticity and music. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *930*(1), 330–336.

Regan, M., & Pose, R. (1993). An interactive graphics display architecture. *Virtual Reality Annual International Symposium, 1993 IEEE* (pp. 293–299).

Reul, J. M. H. M., & Chandramohan, Y. (2007). Epigenetic mechanisms in stress-related memory formation. *Psychoneuroendocrinology*, *32*, S21–S25.

Richardson, A. E., Montello, D. R., & Hegarty, M. (1999). Spatial knowledge acquisition from maps and from navigation in real and virtual environments. *Memory &*

Cognition, *27*(4), 741–750.

Rieser, J. J. (1989). Access to knowledge of spatial structure at novel points of observation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *15*(6), 1157.

Röder, B., & Rösler, F. (1998). Visual input does not facilitate the scanning of spatial images. *Journal of Mental Imagery*, *22* (2-3), 165-181.

Roland, P. E., & Gulyas, B. (1994). Visual imagery and visual representation. *Trends in Neurosciences*, *17*(7), 281–287.

Rösler, F., Röder, B., Heil, M., & Hennighausen, E. (1993). Topographic differences of slow event-related brain potentials in blind and sighted adult human subjects during haptic mental rotation. *Cognitive Brain Research*, *1*(3), 145–159.

Rossano, M. J., & Warren, D. H. (1989). Misaligned maps lead to predictable errors. *Perception*, *18*(2), 215–229.

Rovine, M., Weisman, G. (1989). Sketch-map variables as predictors of wayfinding performance. *Journal of Environmental Psychology*, *9*(3), 217-232.

Ruddle, R. A., Payne, S. J., & Jones, D. M. (1997). Navigating buildings in« desk-top » virtual environments: Experimental investigations using extended navigational experience. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *3*(2), 143.

Runeson, S., & Frykholm, G. (1981). Visual perception of lifted weight. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *7*(4), 733.

Russell, J. A., & Ward, L. M. (1982). Environmental psychology. *Annual Review of Psychology*, *33*, 651-688.

Sadalla, E. K., Montello, D.R. (1989). Remembering Changes in Direction. *Environment and Behavior*, *21*, 346-363.

Sadato, N., Pascual-Leone, 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*(6574), 526–528.

Save, E., Nerad, L., Poucet, B. (2000). Contribution of multiple sensory information to place field stability in hippocampal place cells. *Hippocampus*, *10*(1), 64-76.

Schenk, F., & Morris, R. G. M. (1985). Dissociation between components of spatial memory in rats after recovery from the effects of retrohippocampal lesions. *Experimental Brain Research*, *58*(1), 11–28.

Schlender, D., D., Peters, O. H., & Wienhöfer, M. (2000). The effect of maps and textual information on navigation in a desktop virtual environment. *Spatial Cognition and Computation*, *2*, 421-433.

Self, C. M., Golledge, R. G. (2000). Sex, gender, and cognitive mapping. Dans R. Kitchin and S. Freundschuh (Ed.). *cognitive maps: Past present, and future* (pp. 197-220). London: Routledge.

Seron, X. (2007). La mémoire de travail: Du modèle initial au buffer épisodique. Dans G. Aubin (Éd.), *Neuropsychologie de la mémoire de Travail* (pp. 13-33). Marseille: Solal.

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

Sholl, M. J. (1996). From visual information to cognitive maps. *The construction of cognitive maps*, 157–186.

Shute, V. J. (1984). Caracteritics of cognitive cartographie. Santa Barbara: Graduate school of Education, University of California, Unpublished Ph. D. dissertation.

Siegel, A. W. White, S. H. (1975). The development of spatial representations of large-scale environments. *Adv Child Dev Behav*, *10*, 9-55.

Silverman, I., & Phillips, K. (1993). Effects of estrogen changes during the menstrual cycle on spatial performance. *Ethology and Sociobiology*, *14*(4), 257–269.

Slavik, P., Berka, R. (1999). Navigation system for blind users in mobile computing

environment. *Interactive Applications of Mobile Computing*, 53-60.

Sperling, G. (1960). *The information available in brief visual presentations*. American Psychological Association, *74*, 1-29.

Streri, A. (2000). Intermodal relations in infancy. *Touching for knowing: Cognitive psychology of haptic manual perception*, 191–206.

Sun, H., Chan, G. S. W., Campos, J. L. (2004). Active navigation and orientation-free spatial representations. *Memory & Cognition*, *32*, 51-71.

Sutherland, R. J., & Rodriguez, A. J. (1989). The role of the fornix/fimbria and some related subcortical structures in place learning and memory. *Behavioural Brain Research*, *32*(3), 265–277.

Sutherland, R. J., & Rudy, J. W. (1988). Place learning in the Morris place navigation task is impaired by damage to the hippocampal formation even if the temporal demands are reduced. *Psychobiology*, *16*, 157-163

Taylor, H. A., Tversky, B. (1996). Perspective in spatial descriptions. *Journal of Memory and Language*, *35*(3), 371-391.

Taylor, H. A., & Tversky, B. (1992). Spatial mental models derived from survey and route descriptions. *Journal of Memory and Language*, *31*(2), 261–292.

Thorndyke, P., Hayes-Roth, B. (1982). Differences in spatial knowledge acquired from maps and navigation. *Cognitive Psychology*, *14*, 560-89.

Thorndyke, P. W. (1980). Performance models for spatial and locational cognition. Washington: D.C.: The Rand Corporation.

Thorndyke, P. W. (1983). Spatial learning and reasoning skill. Dans H. L. Pick (Éd.), *Spatial orientation* (pp. 195-217). New York: Plenum.

Thorndyke, P. W., & Hayes-Roth, B. (1979). The use of schemata in the acquisition and transfer of knowledge* 1. *Cognitive Psychology*, *11*(1), 82–106.

Tlauka, M. (1996). Orientation-free represenations from navigation through a computer-simulated environment. *Environment and Behavior*, *28*(5), 647 - 664.

Tlauka, M. W. (1994). The effect of landmarks on route-learning in a computer simulated environment. *Journal of Environmental Psychology*, *14*, 306 - 313.

Tolman, E. C. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review*, *55*(4), 189-208.

Tom, A. (2003). Referring to Landmarks or Street Information in Route Directions: What Difference Does It Make? *Spring-Verlag Berlin Heidelberg*, 362-374.

Tversky, B. (1981). Distortions in memory for maps. *Cognitive Psychology*, *13*, 407-433.

Tversky, B. (1991). Distortions in memory for visual displays. *Pictorial communication in virtual and real environments*, 61–75.

Tversky, B. (1993). Cognitive maps, cognitive collages, and spatial mental models. *Spatial Information Theory A Theoretical Basis for GIS*, 14–24.

Tversky, B. (1996). Spatial perspective in descriptions. Dans P. Bloom (Éd.), *Language and space.* (pp. 463-491). Cambridge: MIT Press.

Tversky, B., & Lee, P. (1999). Pictorial and verbal tools for conveying routes. *Spatial information theory. Cognitive and computational foundations of geographic information science*, 752–752.

Tversky, B., Taylor, H. A., & Mainwaring, S. (1997). Langage et perspective spatial (Spatial perspectives in language). Dans M. E. Denis (Éd.), *Langage et cognition spatiale.* (pp. 25-49). Paris: Masson.

Uhl, F., Kretschmer, T., Lindinger, G., Goldenberg, G., Lang, W., Oder, W., & Deecke, L. (1994). Tactile mental imagery in sighted persons and in patients suffering from peripheral blindness early in life. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *91*(4), 249–255.

Ungar, S., Blades, M., & Spencer, C. (1996). The construction of cognitive maps by children with visual impairments. Dans J., Portugali (Ed.). *The construction of cognitive maps*, (pp. 247–273). The Netherlands : Kluwer.

Velàzquez, R. (2004). Système visuo-tactile d'aide à la mobilité indépendante des déficients visuels dans des environnements 3D non-coopérants. *Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes*, *3*.

Voyer, D. (1995). Magnitude of sex differences in spatial abilities: a meta-analysis and consideration of critical variables. *Psychological Bulletin*, *117*, 250-270.

Wagener, M. (1990). Role of routes in spatial memory. *Paper presented at the meeting of the Psychonomic Society*. New Orleans.

Waller, D., Hunt, E., & Knapp, D. (1998). The transfer of spatial knowledge in virtual environment training. *Presence*, *7*(2), 129–143.

Ward, S. L., Newcombe, N., & Overton, W. F. (1986). Turn left at the church, or three miles north. *Environment and Behavior*, *18*(2), 192.

Warren, D. H. (1973). Early vs. late blindness: The role of early vision in spatial behavior, *26*, 151-170.

Warren, D. H. (1984). Learning spatial dimensions with a visual sensory aid: Molyneux revisited. *Perception*, *13*(3), 331 - 350.

Waugh, N. C. (1965). Primary memory. *Psychological Review*, *72*, 89-104.

Weeks, R., Horwitz, B., Aziz-Sultan, A., Tian, B., Wessinger, C. M., Cohen, L. G., Hallett, M., et al. (2000). A positron emission tomographic study of auditory localization in the congenitally blind. *The Journal of Neuroscience*, *20*(7), 2664.

Wiener, S. I., & Berthoz, A. (1993). Forebrain structures mediating the vestibular contribution during navigation. Dans A., Berthoz (Ed.). *Multisensory Control of Movement* (pp. 427-456). Oxford Univ. Press, Oxford.

Witmer, B. G. (1996). Virtual spaces and real world places: transfer of route knowledge. *International Journal of Human-Computer Studies*, *45*, 413-428.

Witmer, B. G., & Kline, P. B. (1998). Judging perceived and traversed distance in virtual environments. *Presence*, *7*(2), 144–167.

Worchel, P. (1951). Space perception and orientation in the blind. *Psychological monographs*, *65*, 1-28.

Zhang, Y. (2008). Undergraduate students' mental models of the Web as an information retrieval system. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, *59*(13), 2087–2098.

----------ANNEXES

- Annexe 1

  - Tableaux des données brutes des trois expériences.
    - Expérience 1
    - Expérience 2
    - Expérience 3

- Annexe 2

    - *output listings* ANOVA

- Annexe 3

    - Liste des publications

----------ANNEXE 1

----------EXPERIENCE 1

----------PERFORMANCES DE NAVIGATION

Sexe	Age	Parcours	Visite	Temps (S)	Distance (m)	Arrêts	Erreurs	Vitesse km/h	Nbre de Perdus %
1	**26**	S	**1**	**150**	**259,6**	0	0	**6,2**	0
1	35	S	1	157	256,4	0	0	5,9	0
1	34	S	**1**	227	236,1	0	0	3,8	0
2	30	S	1	222	241	0	0	3,9	0
2	25	S	**1**	169	252,3	0	0	3,2	0
2	34	S	2	**212**	**239**	0	0	**5**	0
1	26	S	2	210	343,6	0	0	5,9	0
1	29	S	2	209	343,6	0	0	5,9	0
2	32	S	2	183	225	0	0	4,4	0
2	50	S	2	319	233,4	1	1	2,7	0
2	28	S	3	**154**	**262**	0	0	**6,1**	0
1	48	S	3	333	323,4	0	0	3,5	0
1	28	S	3	227	263,4	0	0	4,2	0
2	33	S	3	176	274,3	0	1	5,6	0
2	22	S	3	199	276,5	0	0	5	0
2	28	S	1	**312**	**471,2**	0	0	**5,4**	0
1	29	C	1	885	1300	0	0	5,3	0
1	24	C	1	389	500,5	0	5	4,6	0
2	34	C	1	372	475,6	0	0	5,3	0
2	30	C	1	329	414,2	0	0	4	0
1	26	C	2	**337**	**471**	0	0	**5**	0
1	37	C	2	702	469,4	2	1	3,8	50
1	45	C	2	443	797,3	1	1	4,1	50
2	38	C	2	1055	941,2	1	4	3,1	50
2	24	C	2	1520	1300	1	14	3,1	50
2	34	C	3	**487**	**439,4**	0	0	**3,3**	0
1	29	C	3	1349	1500	3	5	4	100
1	23	C	3	1202	913,5	1	15	2,7	100
2	29	C	3	967	1000	0	12	4	100
2	33	C	3	1045	1100	0	8	4,1	100

Parcours : S : Simple ; C : Complexe

Visite : 1 : Expérience directe; 2 : Plan visuel 2D; 3 : Visite virtuelle

Sexe : 1 : Homme ; 2 : Femme

----------**EXPERIENCE 2**

----------PERFORMANCES DE NAVIGATION

Parcours simple en condition Plan 2D

Parcours	Visite	Sujets	Age	stress après expérience	FC assise	Moy FC	Temps	arrêts	Erreurs	Réussite au parcours
S	P	1	32	-10	69	71	03:00	1	0	100%
S	P	1	31	2	67	70	03:15	0	0	100%
S	P	1	25	4	84	80	04:00	4	4	100%
S	P	1	31	2	100	108	06:00	2	3	100%
S	P	1	26	-8	86	81	04:00	2	2	100%
S	P	1	60	2	100	94	09:00	10	6	100%
S	P	1	60	6	79	77	04:00	2	1	100%
S	P	2	31	8	95	82	03:15	1	1	100%
S	P	2	26	2	78	72	04:40	2	1	100%
S	P	2	29	2	77	69	05:45	6	0	100%
S	P	2	25	4	78	73	03:00	0	1	100%
S	P	2	26	-4	85	69	08:50	6	3	80%
S	P	2	55	2	60	72	05:00	3	2	100%
S	P	2	50	6	63	69	02:00	0	0	100%
S	P	1	23	2	76	80	03:30	4	3	100%
S	P	1	25	2	75	75	03:30	4	1	100%
S	P	1	30	4	75	74	03:00	0	2	100%
S	P	1	34	10	85	69	04:50	1	1	100%
S	P	1	24	2	77	78	03:00	2	0	100%
S	P	1	45	-8	62	60	02:00	0	0	100%
S	P	1	63	-8	69	69	03:00	0	0	100%
S	P	2	23	6	80	78	06:20	6	2	100%
S	P	2	24	8	73	74	06:00	3	4	100%
S	P	2	26	4	75	80	02:00	0	0	100%
S	P	2	34	8	86	84	02:30	0	0	100%
S	P	2	24	-8	101	105	03:00	1	1	100%
S	P	2	43	-8	75	74	06:10	2	5	50%

Parcours : S: Simple ; C : Complexe

Visite : P : Plan visuel 2D; V : Visite guidée virtuelle

Sexe : 1 : Homme ; 2 : Femme

FC : Fréquence cardiaque

----------**EXPERIENCE 2**

----------PERFORMANCES DE NAVIGATION

Parcours	Visite	Sujets	Age	stress après expérience	FC assise	Moy FC	Temps	arrêts	Erreurs	Réussi le parcours
S	V	1	27	4	72	88	02:00	0	0	100%
S	V	1	37	2	73	73	02:00	0	0	100%
S	V	1	26	2	61	63	03:00	0	0	100%
S	V	1	26	-2	94	87	01:30	0	0	100%
S	V	1	36	-8	67	65	01:30	0	0	100%
S	V	1	53	-8	88	72	02:50	0	1	100%
S	V	1	60	-8	62	63	03:00	2	2	100%
S	V	2	26	4	82	77	03:20	0	2	100%
S	V	2	26	-10	72	70	03:00	0	1	100%
S	V	2	35	2	75	74	01:35	0	0	100%
S	V	2	32	-4	64	62	02:00	0	0	100%

Parcours simple en condition visite guidée virtuelle

S	V	2	25	-2	93	84	01:40	0	0	100%
S	V	2	48	-10	92	86	05:35	0	1	90%
S	V	2	44	2	70	60	03:05	1	1	100%
S	V	1	29	-6	76	81	06:00	0	2	100%
S	V	1	28	4	93	92	01:42	1	0	100%
S	V	1	25	-2	56	56	02:06	0	1	100%
S	V	1	23	-8	99	92	01:30	0	0	100%
S	V	1	28	-8	83	78	01:23	0	0	100%
S	V	1	60	-2	70	70	02:00	1	0	100%
S	V	2	29	-6	89	89	02:00	0	0	100%
Parcours	**Visite**	**Sujets**	**Age**	**stress après expérience**	**FC assise**	**Moy FC**	**Temps**	**arrêts**	**Erreurs**	**Réussi le parcours**
S	V	2	29	-8	93	98				100%
C	P	1	27	6	72	88	09:00	3	1	70%
S	V	2	26	-8	75	75	02:00	0	1	100%
C	P	1	37	6	73	73	07:25	3	2	0%

Parcours : S: Simple ; C : Complexe

Visite : P : Plan visuel 2D; V : Visite guidée virtuelle

Sexe : 1 : Homme ; 2 : Femme

FC : Fréquence cardiaque

----------**EXPERIENCE 2**

----------PERFORMANCES DE NAVIGATION

Parcours complexe en condition Plan 2D

C	P	1	26	6	61	63	06:00	1	1	100%
C	P	1	26	-4	94	87	08:00	4	3	80%
C	P	1	36	4	67	65	05:50	4	3	100%
C	P	1	53	-8	88	72	08:35	7	1	80%
C	P	1	60	-4	62	63	08:20	6	6	100%
C	P	2	26	10	82	77	13:00	6	6	50%
C	P	2	26	2	72	70	09:10	6	3	90%
C	P	2	35	6	75	74	08:00	6	4	100%
C	P	2	32	4	64	62	11:00	4	3	100%
C	P	2	25	8	93	84	06:20	2	2	0%
Parcours	**Visite**	**Sujets**	**Age**	**stress après expérience**	**FC assise**	**Moy FC**	**Temps**	**arrêts**	**Erreurs**	**Réussi le parcours**
C	**V**	**1**	**28**	**-10**	**69**	**71**	**04:00**	**1**	**0**	**100%**
C	**V**	**1**	**25**	**4**	**67**	**70**	**04:00**	**0**	**0**	**100%**
C	P	1	23	8	99	92	07:25	6	2	0%
C	P	1	28	4	83	78	06:45	7	4	90%
C	P	1	60	-2	70	70	04:30	1	2	80%
C	P	2	29	-2	89	89	05:00	3	0	90%
C	P	2	28	4	93	95	12:40	7	7	0%
C	P	2	29	8	80	78	07:00	2	3	0%
C	P	2	26	6	75	75	14:00	5	3	90%
C	P	2	29	-4	93	98	14:00	5	3	50%

Parcours : S: Simple ; C : Complexe

Visite : P : Plan visuel 2D; V : Visite guidée virtuelle

Sexe : 1 : Homme ; 2 : Femme

FC : Fréquence cardiaque

----------**EXPERIENCE 2**

----------PERFORMANCES DE NAVIGATION

Parcours complexe en condition Visite guidée virtuelle

C	V	1	25	2	84	80	04:00	1	0	100%
C	V	1	31	2	100	108	04:00	1	2	100%
C	V	1	26	-8	86	81	06:00	1	1	100%
C	V	1	60	-8	100	94	04:40	0	1	80%
C	V	1	60	2	79	77	05:10	2	1	80%
C	V	2	31	8	95	82	07:10	7	3	100%
C	V	2	26	4	78	72	07:00	7	3	90%
C	V	2	29	-10	77	69	06:30	1	0	100%
C	V	2	25	4	78	73	04:00	0	0	100%
C	V	2	26	-2	85	69	06:30	3	1	80%
C	V	2	55	-10	60	72	04:40	2	1	100%
C	V	2	50	6	63	69	03:30	0	0	100%
C	V	1	23	2	76	80	07:20	7	2	100%
C	V	1	25	2	75	75	03:01	2	1	100%
C	V	1	30	6	75	74	06:21	0	0	100%
C	V	1	34	6	85	69	04:00	1	1	100%
C	V	1	24	4	77	78	04:00	1	0	100%
C	V	1	45	-8	62	60	10:00	7	5	0%
C	V	1	63	4	69	69	05:00	0	1	100%
C	V	2	23	8	80	78	06:10	4	2	90%
C	V	2	24	-10	73	74	09:00	2	4	100%
C	V	2	26	-10	75	80	08:00	2	1	100%
C	V	2	34	-10	86	84	04:05	1	2	100%
C	V	2	24	-8	101	105	03:00	0	0	100%
C	V	2	43	-2	75	74	08:50	3	2	100%

Parcours : S: Simple ; C : Complexe

Visite : P : Plan visuel 2D; V : Visite guidée virtuelle

Sexe : 1 : Homme ; 2 : Femme

FC : Fréquence cardiaque

----------**EXPERIENCE 2**

----------STRATEGIES EMPLOYEES

1	En le verbalisant (tourner à droite puis à gauche)
2	En comptant les d'embranchements
3	En se rappelant le nom des rues
4	En se rappelant l'emplacement des repères
5	En faisant un dessin mental du trajet

Parcours simple en condition Plan 2D

1	P	S	2	5	4	1	3
1	P	S	1	5	2	4	3
1	P	S	1	3	5		
1	P	S	5	3	1		
1	P	S	1	2	3	4	5
1	P	S	3	1	2	4	
1	P	S	5	3	4	1	2
1	P	S	1	3	5	2	4
1	P	S	4	2	5	3	1
1	P	S	1	5	2	3	4
1	P	S	1	5	2	3	4
1	P	S	1	2	5	3	4
1	P	S	2	1	5	3	4
1	P	S	1	2	3	4	5
2	P	S	1	4	5	2	3
2	P	S	5				
2	P	S	1	3	2	4	5
2	P	S	1	5	2	3	
2	P	S	3	5	1	4	2
2	P	S	4	3	2	1	5
2	P	S	2	1	3		
2	P	S	3	5			
2	P	S	4	1	3	5	2
2	P	S	3	4	5	1	2
2	P	S	2	1	3	5	4
2	P	S	4	3			
2	P	S	1	2	5	4	3

Parcours : S: Simple ; C : Complexe ; ***Visite :*** P : Plan visuel 2D; V : Visite guidée virtuelle ;

Sexe : 1 : Homme ; 2 : Femme

----------**EXPERIENCE 2**

----------STRATEGIES EMPLOYEES

Parcours simple en condition Visite guidée virtuelle

1	V	S	3	4			
1	V	S	1	5	4	3	2
1	V	S	1	4	5	2	3

1	V	S	5	2	4	3	1
1	V	S	5	4	1		
1	V	S	4	3	5	2	1
1	V	S	3	4			
1	V	S	1	3			
1	V	S	1	4	3	5	2
1	V	S	5	2	4	1	3
1	V	S	2	4	5	3	1
1	V	S	4	5	2	1	3
1	V	S	4	3	2	5	1
2	V	S	4	5	1	2	3
2	V	S	1	3	2	5	
2	V	S	3	4	2	5	1
2	V	S	3	1	2		
2	V	S	1	3	4	2	5
2	V	S	1	4	2	3	5
2	V	S	3	2	5		
2	V	S	1	5	3	4	2
2	V	S	4	3	5		
2	V	S	4	5	3		
2	V	S	4	1	3	5	2
2	V	S	3	4	2	1	5

Parcours : S: Simple ; C : Complexe ; ***Visite :*** P : Plan visuel 2D; V : Visite guidée virtuelle ;

Sexe : 1 : Homme ; 2 : Femme

----------**EXPERIENCE 2**

----------STRATEGIES EMPLOYEES

Parcours complexe en condition Plan 2D

1	P	C	2	5	3	4	
1	P	C	1	5	4	3	2
1	P	C	1	4	5	2	3
1	P	C	3	1			

1	P	C	3	1	5		
1	P	C	3	2	5	1	4
1	P	C	1	5	4	3	2
1	P	C	4	3	5		
1	P	C	5	1	2	3	
1	P	C	1	3			
1	P	C	3	4	2	1	5
1	P	C	3	2			
1	P	C	1	2	3		
2	P	C	1	5	2	3	4
2	P	C	3	5	2	4	1
2	P	C	2	4	5	3	1
2	P	C	2	3	1	5	4
2	P	C	1	2	3	4	5
2	P	C	1	3	2	5	4
2	P	C	2	5	1		
2	P	C	3	4	2	5	1
2	P	C	1	2	5	3	
2	P	C	1	3	4	2	5
2	P	C	3	5			
2	P	C	5	3			

Parcours : S: Simple ; C : Complexe ; ***Visite :*** P : Plan visuel 2D; V : Visite guidée virtuelle ;

Sexe : 1 : Homme ; 2 : Femme

----------**EXPERIENCE 2**

----------STRATEGIES EMPLOYEES

Parcours complexe en condition Visite guidée virtuelle

1	V	C	2	5	4	1	3
1	V	C	5	3	1	4	2

1	V	C	4	3			
1	V	C	5	2	1	4	3
1	V	C	3	1	4	2	
1	V	C	3	1	4		
1	V	C	1	4	5	2	3
1	V	C	5				
1	V	C	1	3	2	4	5
1	V	C	1	2	4		
1	V	C	3	2	1	5	4
1	V	C	3	4	1	2	5
1	V	C	3	4	1		
1	V	C	3				
2	V	C	3	1	4	2	5
2	V	C	3	4	1		
2	V	C	4	3			
2	V	C	3	4			
2	V	C	3	4	1	5	2
2	V	C	5	3	4	1	2
2	V	C	3	5	3	1	4
2	V	C	3	2	4	5	1
2	V	C	4	3	2	1	5
2	V	C	1	3	4		
2	V	C	3	4	1	5	2
2	V	C	1	4	3	2	5
2	V	C	3				

----------**EXPERIENCE 3**

Parcours simple

GPE	Sexe	Age	Visite	Temps	Distance (m)	arrivée	Erreurs	Arrêts	Vitesse km/h	Modalité d'Apprentissage	Modalité sensorielle la plus utilisé
M	1	31	G	2min 59s	185,4	100%	0	0	4,4	Emplacement des repères, bruit et voiture	Ouie et toucher (terrain)

M	1	46	G	3min 14s	165,8	100%	0	0	3	Verbaliser	Vision
M	1	40	P	3min 12s	175,4	100%	0	0	3,3	Verbaliser	Vision
M	2	26	P	3min 58s	249	100%	0	0	3,7	Dessin mental	Odorat et vue
M	1	23	VI	5min24s	217,9	100%	1	0	2,4	Dessin mental	Vue et odorat puis ouie
M	2	72	VI	3min 25s	121,1	0%	0	0	2,1	Verbaliser	Toucher de la canne
AN	1	48	G	3min 8s	149,1	100%	0	0	2,9	Verbaliser	Ouie et toucher (terrain)
AN	1	42	G	3min 7s	190	100%	0	0	3,7	Dessin mental	Ouie et intuition
AN	2	46	P	4min 57s	108,8	0%	1	0	1,3	Dessin mental	Ouie
AN	1	60	P	4min56s	140	100%	0	0	2,2	Dessin mental	Toucher, ouie et odeur
AN	2	41	VI	4min 21s	141,9	0%	1	0	1,9	Dessin mental	Ouie
AN	2	46	VI	4min18	165,4	100%	0	0	2,3	Dessin mental	Ouie et toucher
AT	1	72	G	10min 28s	182,4	100%	1	3	1	Verbaliser	Toucher et ouie
AT	2	54	G	4min 37s	166,8	100%	0	0	2,2	Dessin mental	Ouie et toucher
AT	1	58	P	7min 53s	203,1	100%	1	3	1,5	Verbaliser	Ouie et toucher
AT	1	67	P	5min41s	132,3	0%	1	0	1,3	Dessin mental	Ouie
AT	1	58	VI	4min 44s	196,4	100%	0	0	2,5	Dessin mental	Ouie et toucher
AT	2	44	VI	4min 39s	227	100%	0	0	2,9	Dessin mental	Ouie
VYB	1	30	G	10min	160	0%	2	4	1	Dessin mental	Ouie
VYB	2	32	G	7min 34s	150,4	0%	1	3	1,1	Dessin mental	Toucher et ouie
VYB	1	26	P	13min 25s	182,9	0%	1	2	0,7	Dessin mental	Toucher
VYB	2	26	P	6min46	166	100%	0	0	1,9	Dessin mental	Ouie et Toucher de la canne et des mains
VYB	1	35	VI	11min 30s	217.5	100%	0	2	1,1	Dessin mental	Ouie et Toucher de la canne et des mains
VYB	2	23	VI	10min	182,1	100%	0	2	1,1	Verbaliser puis Dessin mental	Ouie et Toucher de la canne et des mains

M: malvoyant
AN: aveugle de naissance
AT: aveugle adulte
VYB: voyants yeux bandés
1: Homme, **2:**Femme

G : Expérience directe
P : Plan tactile 2D
VI : Indications verbales

----------**EXPERIENCE 3**

Parcours complexe

GPE	Sexe	Age	Visite	Temps réel (m)	Distance (m)	arrivée	Erreurs	Arrêts	Vitesse km/h	Modalité d'Apprentissage	Modalité sensorielle la plus utilisé
M	1	40	G	10min 8s	637,2	Oui	1	1	3,8	Verbaliser puis l'emplacement des repères	Vision et ouie
M	2	46	G	14min 4s	580	Oui	0	0	2,4	Verbaliser et dessin mental	Ouie et vision

M	1	31	P	13min 12s	825,3	Oui	1	1	3,7	DESSIN MENTAL ET repères	Ouie et toucher
M	2	72	P	13min 5s	618,6	Oui	0	0	2,8	DESSIN MENTAL	Ouie
M	1	23	VI	8min 30s	598	Oui	1	0	4,2	Dessin mental	Ouie
M	2	26	VI	8min 51s	625,3	Oui	0	0	4,2	Verbaliser	Visiion puis ouie et toucher
AN	2	41	G	11min16s	623,6	Oui	0	1	3,3	Verbaliser	Ouie et odorat
AN	2	46	G	13min37s	584	Oui	0	0	2,5	dessin mental puis verbalisé	Ouie et toucher
AN	1	42	P	13min 34s	926,1	Oui	1	3	4,1	dessin mental	Ouie et toucher
AN	1	48	P	13min 7s	687,7	Non	0	0	3,1	verbaliser, dessin mental, emplacement des repères	Ouie et toucher
AN	1	60	VI	14min 3s	688	Oui	0	2	2,9	Verbaliser	Ouie et toucher
AN	2	46	VI	20min 18s	647,2	Oui	0	2	1,9	Verbaliser et dessin mental	Ouie et toucher
AT	1	58	G	20min 18s	730	Oui	1	2	1,5	Verbaliser	Ouie
AT	2	54	G	19min 27s	728,3	Oui	0	5	2,2	Dessin mental puis verbalisé	Ouie
AT	1	72	P	18min 44s	565,6	Oui	0	5	1,8	Dessin mental	Toucher et ouie
AT	2	44	P	11min 8s	672,2	Oui	0	0	3,6	Dessin mental	Ouie
AT	1	58	VI	18min 48s	731,3	Non	1	3	2,3	Verbaliser	Ouie
AT	1	67	VI	18min 18s	533,5	Oui	0	3	1,7	Verbaliser	Toucher puis ouie
VYB	1	35	G	23min44s	648.8	OUi	0	3	1,6	Dessin mental	Toucher puis ouie
VYB	2	26	G	15min 45s	596	Oui	0	2	2,2	Dessin puis verbalisé	Toucher puis ouie
VYB	2	32	P	9min 12s	145	Non	1	2	0,9	Nom des rues	Ouie
VYB	2	23	P	20min	600	Non	0	0	1,9	Dessin mental	Ouie puis toucher de la canne
VYB	1	26	VI	37min	900	Oui	3	6	0,8	Dessin mental	Toucher
VYB	1	30	VI	20min	650	Oui	1	5	1,5	Dessin mental	Ouie et toucher

M: malvoyant
AN: aveugle de naissance
AT: aveugle adulte
VYB: voyants yeux bandés
1: Homme, **2:**Femme

G : Expérience directe
P : Plan tactile 2D
VI : Indications verbales

----------ANNEXE 2

----------LISTING ANOVA EXPERIENCE 1

Two Way Analysis of Variance lundi, novembre 08, 2010, 15:48:17

Data source: Data 1 in PereLachaise

Balanced Design

Dependent Variable: number of wrong turns

Normality Test: (P < 0,050)

Equal Variance Test: (P = 0,104)

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
route	1	165,375	165,375	11,860	<0,001
navigation aid	2	81,333	40,667	3,808	0,042
route x navigation aid	2	73,000	36,500	3,417	0,055
Residual	18	192,250	10,681		
Total	23	511,958	22,259		

The difference in the mean values among the different levels of route is greater than would be expected by chance after allowing for effects of differences in navigation aid. There is a statistically significant difference (P = <0,001). To isolate which group(s) differ from the others use a multiple comparison procedure.

The difference in the mean values among the different levels of navigation aid is greater than would be expected by chance after allowing for effects of differences in route. There is a statistically significant difference (P = 0,042). To isolate which group(s) differ from the others use a multiple comparison procedure.

The effect of different levels of route does not depend on what level of navigation aid is present. There is not a statistically significant interaction between route and navigation aid. (P = 0,055)

Power of performed test with alpha = 0,0500: for route : 0,962
Power of performed test with alpha = 0,0500: for navigation aid : 0,475
Power of performed test with alpha = 0,0500: for route x navigation aid : 0,415

Least square means for route :

Group	Mean
simple	0,167
complex	5,417

Std Err of LS Mean = 0,943

Least square means for navigation aid :

Group	Mean
1,000	0,625
2,000	2,625
3,000	5,125

Std Err of LS Mean = 1,155

Least square means for route x navigation aid :

Group	Mean
simple x 1,000	0,000
simple x 2,000	0,250

simple x 3,000 0,250
complex x 1,000 1,250
complex x 2,000 5,000
complex x 3,000 10,000
Std Err of LS Mean = 1,634

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Holm-Sidak method):
Overall significance level = 0,05

One Way Analysis of Variance lundi, novembre 08, 2010, 16:34:08

Data source: Data 1 in PereLachaise

Dependent Variable: time from departure on complex route

Normality Test: Passed(P = 0,656)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,241)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
1,000	4	0	493,750	262,053	131,026
2,000	4	0	930,000	466,504	233,252
3,000	4	0	1140,750	169,781	84,890

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	2	871118,167	435559,083	4,157	0,053
Residual	9	945369,500	105041,056		
Total	11	1816487,667			

The differences in the mean values among the treatment groups are not great enough to exclude the possibility that the difference is due to random sampling variability; there is not a statistically significant difference (P = 0,053).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,454

The power of the performed test (0,454) is below the desired power of 0,800.
Less than desired power indicates you are less likely to detect a difference when one actually exists. Negative results should be interpreted cautiously.

One Way Analysis of Variance lundi, novembre 08, 2010, 16:35:37

Data source: Data 1 in PereLachaise

Dependent Variable: average speed on complex route

Normality Test: Passed(P = 0,062)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,879)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
1,000	4	0	4,800	0,627	0,314
2,000	4	0	3,525	0,506	0,253
3,000	4	0	3,700	0,668	0,334

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	2	3,822	1,911	5,495	0,031
Residual	9	3,287	0,365		
Total	11	7,109			

The differences in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P = 0,031).

Power of performed test with alpha = 0,050: 0,583

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Holm-Sidak method):
Overall significance level = 0,05

Comparisons for factor: **navigation aid**

Comparison	Diff of Means	t	Unadjusted P	Critical Level	Significant?
1,000 vs. 2,000	1,275	2,983	0,015	0,017	Yes
1,000 vs. 3,000	1,100	2,574	0,030	0,025	No
3,000 vs. 2,000	0,175	0,409	0,692	0,050	No

----------**LISTING ANOVA EXPERIENCE 2**

Three Way Analysis of Variance mardi, septembre 21, 2010, 11:58:10

Data source: Data 1 in GoogleStreetView

General Linear Model

Dependent Variable: wrong turns

Normality Test: (P < 0,050)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,106)

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Map/Direct	2	52,723	26,362	8,521	<0,001
Noise/NoNoise	1	6,364	6,364	2,057	0,155
Male/Female	1	28,353	28,353	9,164	0,003
Map/Direct x Noise/NoNoise	2	26,179	13,089	4,231	0,017
Map/Direct x Male/Female	2	11,892	5,946	1,922	0,152
Noise/NoNoise x Male/Female	1	0,289	0,289	0,0935	0,760
Map/Direct x Noise/NoNoise x M	2	8,301	4,151	1,342	0,266
Residual	92	284,635	3,094		
Total	103	407,346	3,955		

The main effects for Map/Direct cannot be properly interpreted since the size of the factor's effect depends upon the level of another factor.

The main effects for Noise/NoNoise cannot be properly interpreted since the size of the factor's effect depends upon the level of another factor.

The difference in the mean values among the different levels of Male/Female are greater than would be expected by chance after allowing for the effects of differences in Map/Direct and Noise/NoNoise. There is a statistically significant difference (P = 0,003). To isolate which group(s) differ from the others use a multiple comparison procedure.

The effect of different levels of Map/Direct depends on what level of Noise/NoNoise is present. There is a statistically significant interaction between Map/Direct and Noise/NoNoise. (P = 0,017)

The effect of different levels of Map/Direct does not depend on what level of Male/Female is present. There is not a statistically significant interaction between Map/Direct and Male/Female. (P = 0,152)

The effect of different levels of Noise/NoNoise does not depend on what level of Male/Female is present. There is not a statistically significant interaction between Noise/NoNoise and Male/Female. (P = 0,760)

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Holm-Sidak method):
Overall significance level = 0,05

Comparisons for factor: **Map/Direct**

Comparison	Diff of Means	t	Unadjusted P	Critical Level	Significant?
map vs. direct	1,453	3,875	<0,001	0,017	Yes
map vs. direct	1,369	2,491	0,015	0,025	Yes
map vs. map	0,0841	0,148	0,883	0,050	No

Comparisons for factor: **Noise/NoNoise**

Comparison	Diff of Means	t	Unadjusted P	Critical Level	Significant?
noise vs. NoNoise	0,591	1,434	0,155	0,050	No

Comparisons for factor: **Male/Female**

Comparison	Diff of Means	t	Unadjusted P	Critical Level	Significant?
female vs. male	1,248	3,027	0,003	0,050	Yes

Comparisons for factor: **Noise/NoNoise within map**

Comparison	Diff of Means	t	Unadjusted P	Critical Level	Significant?
noise vs. NoNoise	0,582	0,714	0,477	0,050	No

Comparisons for factor: **Noise/NoNoise within map**

Comparison	Diff of Means	t	Unadjusted P	Critical Level	Significant?
noise vs. NoNoise	0,0227	0,0298	0,976	0,050	No

Comparisons for factor: **Noise/NoNoise within direct**

Comparison	Diff of Means	t	Unadjusted P	Critical Level	Significant?
noise vs. NoNoise	1,214	2,276	0,025	0,050	Yes

Comparisons for factor: **Map/Direct within noise**

Comparison	Diff of Means	t	Unadjusted P	Critical Level	Significant?
map vs. map	2,250	2,288	0,024	0,017	No
map vs. direct	1,500	1,806	0,074	0,025	No
direct vs. map	0,750	0,949	0,345	0,050	No

Comparisons for factor: **Map/Direct within NoNoise**

Comparison	Diff of Means	t	Unadjusted P	Critical Level	Significant?
map vs. direct	2,132	4,197	<0,001	0,017	Yes
map vs. map	1,691	3,210	0,002	0,025	Yes
map vs. direct	0,442	0,901	0,370	0,050	No

Comparisons for factor: **Male/Female within map**

Comparison	Diff of Means	t	Unadjusted P	Critical Level	Significant?
female vs. male	1,735	2,206	0,030	0,050	Yes

Comparisons for factor: **Male/Female within map**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
male vs. female	2,881	3,629	<0,001	0,050	Yes

Comparisons for factor: **Male/Female within direct**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
male vs. female	0,873	1,649	0,103	0,050	No

Comparisons for factor: **Map/Direct within male**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
map vs. map	2,583	2,627	0,010	0,017	Yes
map vs. direct	1,567	1,914	0,059	0,025	No
direct vs. map	1,017	1,306	0,195	0,050	No

Comparisons for factor: **Map/Direct within female**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
map vs. map	2,032	3,829	<0,001	0,017	Yes
map vs. direct	1,591	2,941	0,004	0,025	Yes
direct vs. map	0,442	0,901	0,370	0,050	No

Comparisons for factor: **Male/Female within noise**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
male vs. female	0,465	0,822	0,413	0,050	No

Comparisons for factor: **Male/Female within NoNoise**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
male vs. female	0,717	1,197	0,235	0,050	No

Comparisons for factor: **Noise/NoNoise within male**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
NoNoise vs. noise	1,374	2,276	0,025	0,050	Yes

Comparisons for factor: **Noise/NoNoise within female**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
NoNoise vs. noise	1,122	1,998	0,049	0,050	Yes

Power of performed test with alpha = 0,0500: for Map/Direct : 0,950

Power of performed test with alpha = 0,0500: for Noise/NoNoise : 0,162
Power of performed test with alpha = 0,0500: for Male/Female : 0,822
Power of performed test with alpha = 0,0500: for Map/Direct x Noise/NoNoise : 0,598
Power of performed test with alpha = 0,0500: for Map/Direct x Male/Female : 0,196
Power of performed test with alpha = 0,0500: for Noise/NoNoise x Male/Female : 0,0500

Least square means for Map/Direct :

Group	**Mean**	**SEM**
map	2,375	0,492
map	2,459	0,284
direct	1,006	0,245

Least square means for Noise/NoNoise :

Group	**Mean**	**SEM**
noise	2,242	0,302
NoNoise	1,651	0,281

Least square means for Male/Female :

Group	**Mean**	**SEM**
male	1,323	0,283
female	2,571	0,300

Least square means for Map/Direct x Noise/NoNoise :

Group	**Mean**	**SEM**
map x noise	3,500	0,718
map x NoNoise	1,250	0,672
map x noise	2,000	0,417
map x NoNoise	2,918	0,384
direct x noise	1,227	0,360
direct x NoNoise	0,786	0,332

Least square means for Map/Direct x Male/Female :

Group	**Mean**	**SEM**
map x male	1,083	0,672
map x female	3,667	0,718
map x male	2,100	0,393
map x female	2,818	0,409
direct x male	0,786	0,339
direct x female	1,227	0,354

Least square means for Noise/NoNoise x Male/Female :

Group	**Mean**	**SEM**
noise x male	1,556	0,419
noise x female	2,929	0,435

NoNoise x male	1,090	0,381
NoNoise x female	2,212	0,413

Least square means for Map/Direct x Noise/NoNoise x M :

Group	**Mean**	**SEM**
map x noise x male	1,667	1,016
map x noise x female	5,333	1,016
map x NoNoise x male	0,500	0,879
map x NoNoise x female	2,000	1,016
map x noise x male	2,000	0,556
map x noise x female	2,000	0,622
map x NoNoise x male	2,200	0,556
map x NoNoise x female	3,636	0,530
direct x noise x male	1,000	0,488
direct x noise x female	1,455	0,530
direct x NoNoise x male	0,571	0,470
direct x NoNoise x female	1,000	0,470

Three Way Analysis of Variance mardi, septembre 21, 2010, 11:56:18

Data source: Data 1 in GoogleStreetView

General Linear Model

Dependent Variable: success rates

Source of Variation	**DF**	**SS**	**MS**	**F**	**P**
Map/Direct	2	7679,858	3839,929	5,178	0,007
Noise/NoNoise	1	459,565	459,565	0,620	0,433
Male/Female	1	898,030	898,030	1,211	0,274
Map/Direct x Noise/NoNoise	2	128,649	64,325	0,0867	0,917
Map/Direct x Male/Female	2	1444,407	722,204	0,974	0,381
Noise/NoNoise x Male/Female	1	59,035	59,035	0,0796	0,778
Map/Direct x Noise/NoNoise x M	2	664,736	332,368	0,448	0,640
Residual	92	68228,334	741,612		
Total	103	78622,115	763,322		

The difference in the mean values among the different levels of Map/Direct are greater than would be expected by chance after allowing for the effects of differences in Noise/NoNoise and Male/Female. There is a statistically significant difference (P = 0,007). To isolate which group(s) differ from the others use a multiple comparison procedure.

The difference in the mean values among the different levels of Noise/NoNoise are not great enough to exclude the possibility that the difference is just due to random sampling variability after allowing for the effects of differences in Map/Direct and Male/Female. There is not a statistically significant difference (P = 0,433).

The difference in the mean values among the different levels of Male/Female are not great enough to exclude the possibility that the difference is just due to random sampling variability after allowing for the effects of differences in Map/Direct and Noise/NoNoise. There is not a statistically significant difference (P = 0,274).

The effect of different levels of Map/Direct does not depend on what level of Noise/NoNoise is present. There is not a statistically significant interaction between Map/Direct and Noise/NoNoise. (P = 0,917)

The effect of different levels of Map/Direct does not depend on what level of Male/Female is present. There is not a statistically significant interaction between Map/Direct and Male/Female. (P = 0,381)

The effect of different levels of Noise/NoNoise does not depend on what level of Male/Female is present. There is not a statistically significant interaction between Noise/NoNoise and Male/Female. (P = 0,778)

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Holm-Sidak method):
Overall significance level = 0,05

Comparisons for factor: **Map/Direct**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
direct vs. map	18,549	3,196	0,002	0,017	Yes
direct vs. map	10,975	1,290	0,200	0,025	No
map vs. map	7,574	0,862	0,391	0,050	No

Comparisons for factor: **Noise/NoNoise**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
NoNoise vs. noise	5,023	0,787	0,433	0,050	No

Comparisons for factor: **Male/Female**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
male vs. female	7,022	1,100	0,274	0,050	No

Comparisons for factor: **Noise/NoNoise within map**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
noise vs. NoNoise	0,939	0,0745	0,941	0,050	No

Comparisons for factor: **Noise/NoNoise within map**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
NoNoise vs. noise	6,116	0,518	0,606	0,050	No

Comparisons for factor: **Noise/NoNoise within direct**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
NoNoise vs. noise	22,125	2,679	0,009	0,050	Yes

Comparisons for factor: **Map/Direct within noise**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
map vs. direct	14,208	1,161	0,249	0,017	No
map vs. map	7,917	0,520	0,604	0,025	No
map vs. direct	6,292	0,489	0,626	0,050	No

Comparisons for factor: **Map/Direct within NoNoise**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
direct vs. map	16,773	2,132	0,036	0,017	No
map vs. map	14,972	1,836	0,070	0,025	No
direct vs. map	1,801	0,237	0,813	0,050	No

Comparisons for factor: **Male/Female within map**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
male vs. female	19,981	1,641	0,104	0,050	No

Comparisons for factor: **Male/Female within map**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
female vs. male	18,059	1,469	0,145	0,050	No

Comparisons for factor: **Male/Female within direct**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
female vs. male	16,974	2,071	0,041	0,050	Yes

Comparisons for factor: **Map/Direct within male**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
map vs. map	17,917	1,177	0,242	0,017	No
map vs. direct	13,083	1,086	0,280	0,025	No
direct vs. map	4,833	0,381	0,704	0,050	No

Comparisons for factor: **Map/Direct within female**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
direct vs. map	23,872	2,851	0,005	0,017	Yes
map vs. map	20,123	2,449	0,016	0,025	Yes

direct vs. map	3,749	0,494	0,623	0,050	No

Comparisons for factor: **Male/Female within noise**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
female vs. male	3,223	0,368	0,714	0,050	No

Comparisons for factor: **Male/Female within NoNoise**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
female vs. male	6,824	0,735	0,464	0,050	No

Comparisons for factor: **Noise/NoNoise within male**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
noise vs. NoNoise	8,822	0,944	0,348	0,050	No

Comparisons for factor: **Noise/NoNoise within female**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
noise vs. NoNoise	5,222	0,601	0,550	0,050	No

Power of performed test with alpha = 0,0500: for Map/Direct : 0,726
Power of performed test with alpha = 0,0500: for Noise/NoNoise : 0,0500
Power of performed test with alpha = 0,0500: for Male/Female : 0,0698
Power of performed test with alpha = 0,0500: for Map/Direct x Noise/NoNoise : 0,0500
Power of performed test with alpha = 0,0500: for Map/Direct x Male/Female : 0,0500
Power of performed test with alpha = 0,0500: for Noise/NoNoise x Male/Female : 0,0500

Least square means for Map/Direct :

Group	**Mean**	**SEM**
map	85,625	7,612
map	78,051	4,391
direct	96,600	3,795

Least square means for Noise/NoNoise :

Group	**Mean**	**SEM**
noise	84,247	4,672
NoNoise	89,270	4,347

Least square means for Male/Female :

Group	**Mean**	**SEM**
male	90,270	4,381

female 83,248 4,640

Least square means for Map/Direct x Noise/NoNoise :

Group	Mean	SEM
map x noise	81,667	11,118
map x NoNoise	89,583	10,400
map x noise	75,375	6,459
map x NoNoise	80,727	5,949
direct x noise	95,699	5,578
direct x NoNoise	97,500	5,146

Least square means for Map/Direct x Male/Female :

Group	Mean	SEM
map x male	94,583	10,400
map x female	76,667	11,118
map x male	81,500	6,089
map x female	74,602	6,327
direct x male	94,725	5,245
direct x female	98,474	5,486

Least square means for Noise/NoNoise x Male/Female :

Group	Mean	SEM
noise x male	88,658	6,484
noise x female	79,836	6,727
NoNoise x male	91,881	5,893
NoNoise x female	86,659	6,391

Least square means for Map/Direct x Noise/NoNoise x M :

Group	Mean	SEM
map x noise x male	96,667	15,723
map x noise x female	66,667	15,723
map x NoNoise x male	92,500	13,616
map x NoNoise x female	86,667	15,723
map x noise x male	77,000	8,612
map x noise x female	73,750	9,628
map x NoNoise x male	86,000	8,612
map x NoNoise x female	75,455	8,211
direct x noise x male	92,308	7,553
direct x noise x female	99,091	8,211
direct x NoNoise x male	97,143	7,278
direct x NoNoise x female	97,857	7,278

Three Way Analysis of Variance samedi, octobre 30, 2010, 17:59:35

Data source: Data 1 in GoogleStreetView

General Linear Model

Dependent Variable: success rates averaged over noise factor

Normality Test: (P < 0,050)

Equal Variance Test: (P < 0,050)

Source of Variation	**DF**	**SS**	**MS**	**F**	**P**
Itinerary	1	11741,125	11741,125	21,527	<0,001
Prior exposure	1	7880,819	7880,819	14,449	<0,001
Sex	1	334,049	334,049	0,612	0,436
Itinerary x Prior exposure	1	5634,939	5634,939	10,332	0,002
Itinerary x Sex	1	20,878	20,878	0,0383	0,845
Prior exposure x Sex	1	1288,899	1288,899	2,363	0,128
Itinerary x Prior exposure x S	1	492,551	492,551	0,903	0,344
Residual	96	52358,974	545,406		
Total	103	78622,115	763,322		

The main effects for Itinerary cannot be properly interpreted since the size of the factor's effect depends upon the level of another factor.

The main effects for Prior exposure cannot be properly interpreted since the size of the factor's effect depends upon the level of another factor.

The difference in the mean values among the different levels of Sex are not great enough to exclude the possibility that the difference is just due to random sampling variability after allowing for the effects of differences in Itinerary and Prior exposure. There is not a statistically significant difference (P = 0,436).

The effect of different levels of Itinerary depends on what level of Prior exposure is present. There is a statistically significant interaction between Itinerary and Prior exposure. (P = 0,002)

The effect of different levels of Itinerary does not depend on what level of Sex is present. There is not a statistically significant interaction between Itinerary and Sex. (P = 0,845)

The effect of different levels of Prior exposure does not depend on what level of Sex is present. There is not a statistically significant interaction between Prior exposure and Sex. (P = 0,128)

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Holm-Sidak method):
Overall significance level = 0,05

Comparisons for factor: **Itinerary**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**

simple vs. complex	21,282	4,640	<0,001	0,050	Yes

Comparisons for factor: **Prior exposure**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
direct vs. map	17,436	3,801	<0,001	0,050	Yes

Comparisons for factor: **Sex**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
male vs. female	3,590	0,783	0,436	0,050	No

Comparisons for factor: **Prior exposure within simple**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
map vs. direct	36,026	5,554	<0,001	0,050	Yes

Comparisons for factor: **Prior exposure within complex**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
map vs. direct	6,538	1,008	0,316	0,050	No

Comparisons for factor: **Itinerary within map**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
complex vs. simple	2,692	0,415	0,679	0,050	No

Comparisons for factor: **Itinerary within direct**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
complex vs. simple	32,179	4,961	<0,001	0,050	Yes

Comparisons for factor: **Sex within simple**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
male vs. female	20,385	3,205	0,002	0,050	Yes

Comparisons for factor: **Sex within complex**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
male vs. female	22,179	3,355	0,001	0,050	Yes

Comparisons for factor: **Itinerary within male**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
simple vs. complex	2,692	0,415	0,679	0,050	No

Comparisons for factor: **Itinerary within female**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
simple vs. complex	4,487	0,692	0,491	0,050	No

Comparisons for factor: **Sex within map**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
female vs. male	10,385	1,633	0,106	0,050	No

Comparisons for factor: **Sex within direct**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
female vs. male	24,487	3,704	<0,001	0,050	Yes

Comparisons for factor: **Prior exposure within male**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
map vs. direct	10,641	1,640	0,104	0,050	No

Comparisons for factor: **Prior exposure within female**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
direct vs. map	3,462	0,534	0,595	0,050	No

Power of performed test with alpha = 0,0500: for Itinerary : 0,998
Power of performed test with alpha = 0,0500: for Prior exposure : 0,968
Power of performed test with alpha = 0,0500: for Sex : 0,0500
Power of performed test with alpha = 0,0500: for Itinerary x Prior exposure : 0,874
Power of performed test with alpha = 0,0500: for Itinerary x Sex : 0,0500
Power of performed test with alpha = 0,0500: for Prior exposure x Sex : 0,197

Least square means for Itinerary :

Group	**Mean**
simple	98,654
complex	77,372

Std Err of LS Mean = 3,243

Least square means for Prior exposure :

Group	**Mean**
map	79,295
direct	96,731

Std Err of LS Mean = 3,243

Least square means for Sex :

Group	Mean	SEM
male	89,808	3,180
female	86,218	3,305

Least square means for Itinerary x Prior exposure :

Group	Mean	SEM
simple x map	97,308	4,498
simple x direct	100,000	4,675
complex x map	61,282	4,675
complex x direct	93,462	4,498

Least square means for Itinerary x Sex :

Group	Mean	SEM
simple x male	100,000	4,498
simple x female	97,308	4,675
complex x male	79,615	4,498
complex x female	75,128	4,675

Least square means for Prior exposure x Sex :

Group	Mean	SEM
map x male	84,615	4,498
map x female	73,974	4,675
direct x male	95,000	4,498
direct x female	98,462	4,675

Least square means for Itinerary x Prior exposure x S :

Group	Mean	SEM
simple x map x male	100,000	6,242
simple x map x female	94,615	6,477
simple x direct x male	100,000	6,477
simple x direct x female	100,000	6,742
complex x map x male	69,231	6,477
complex x map x female	53,333	6,742
complex x direct x male	90,000	6,242
complex x direct x female	96,923	6,477

Two Way Analysis of Variance samedi, octobre 30, 2010, 18:23:00

Data source: Data 1 in GoogleStreetView

General Linear Model

Dependent Variable: navigation times in complex route condition

Normality Test: Passed(P = 0,083)

Equal Variance Test: Passed (P = 0,212)

Source of Variation	**DF**	**SS**	**MS**	**F**	**P**
prior exp complex	1	386754,957	386754,957	17,253	<0,001
sex in complex	1	119953,236	119953,236	5,351	0,025
prior exp x sex	1	31657,167	31657,167	1,412	0,241
Residual	48	1075998,785	22416,641		
Total	51	1601284,231	31397,730		

The difference in the mean values among the different levels of prior exp complex is greater than would be expected by chance after allowing for effects of differences in sex in complex. There is a statistically significant difference (P = <0,001). To isolate which group(s) differ from the others use a multiple comparison procedure.

The difference in the mean values among the different levels of sex in complex is greater than would be expected by chance after allowing for effects of differences in prior exp complex. There is a statistically significant difference (P = 0,025). To isolate which group(s) differ from the others use a multiple comparison procedure.

The effect of different levels of prior exp complex does not depend on what level of sex in complex is present. There is not a statistically significant interaction between prior exp complex and sex in complex. (P = 0,241)

Power of performed test with alpha = 0,0500: for prior exp complex : 0,986
Power of performed test with alpha = 0,0500: for sex in complex : 0,526
Power of performed test with alpha = 0,0500: for prior exp com x sex in comple : 0,0906

Least square means for prior exp complex :

Group	**Mean**	**SEM**
map	511,272	29,968
direct	338,533	28,834

Least square means for sex in complex :

Group	**Mean**	**SEM**
male	376,802	28,834
female	473,003	29,968

Least square means for prior exp com x sex in comple :

Group	**Mean**	**SEM**
map x male	438,462	41,525
map x female	584,083	43,221

direct x male	315,143	40,015
direct x female	361,923	41,525

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Holm-Sidak method):
Overall significance level = 0,05

Comparisons for factor: **prior exp complex**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
map vs. direct	172,739	4,154	<0,001	0,050	Yes

Comparisons for factor: **sex in complex**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
female vs. male	96,201	2,313	0,025	0,050	Yes

Comparisons for factor: **sex in complex within map**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
female vs. male	145,622	2,430	0,019	0,050	Yes

Comparisons for factor: **sex in complex within direct**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
female vs. male	46,780	0,811	0,421	0,050	No

Comparisons for factor: **prior exp complex within male**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
map vs. direct	123,319	2,138	0,038	0,050	Yes

Comparisons for factor: **prior exp complex within female**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
map vs. direct	222,160	3,707	<0,001	0,050	Yes

----------**LISTING ANOVA EXPERIENCE 3**

Two Way Analysis of Variance mercredi, avril 27, 2011, 18:47:50

Data source: Data 1 in BlindData

Balanced Design

Dependent Variable: navigation times

Normality Test: (P < 0,050)

Equal Variance Test: (P = 0,383)

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
type of visual deficit	3	1549791,896	516597,299	2,989	0,044
familiarisation	2	110305,542	55152,771	0,319	0,729
type of deficit x familiarisation	6	451739,292	75289,882	0,436	0,850
Residual	36	6221912,750	172830,910		
Total	47	8333749,479	177313,819		

The difference in the mean values among the different levels of type of deficit is greater than would be expected by chance after allowing for effects of differences in familiarisation. There is a statistically significant difference (P = 0,044). To isolate which group(s) differ from the others use a multiple comparison procedure.

The difference in the mean values among the different levels of familiarisation is not great enough to exclude the possibility that the difference is just due to random sampling variability after allowing for the effects of differences in type de déficit. There is not a statistically significant difference (P = 0,729).

The effect of different levels of type de déficit does not depend on what level of familiarisation is present. There is not a statistically significant interaction between type of deficit and familiarisation. (P = 0,850)

Power of performed test with alpha = 0,0500: for type of deficit : 0,461
Power of performed test with alpha = 0,0500: for familiarisation : 0,0500
Power of performed test with alpha = 0,0500: for type of deficit x familiarisati : 0,0500

Least square means for type of deficit :

Group	Mean
congénitaux	553,500
aveuglestardifs	721,250
malvoyants	450,167
voyantsbandés	924,667

Std Err of LS Mean = 120,011

Least square means for familiarisation :

Group	Mean
tactile	610,625
guidée	650,375
verbale	726,188

Std Err of LS Mean = 103,932

Least square means for type of deficit x familiarisation :

Group	Mean
congénitaux x tactile	548,500
congénitaux x guidée	467,000
congénitaux x verbale	645,000

aveuglestardifs x tactile	651,500
aveuglestardifs x guidée	822,500
aveuglestardifs x verbale	689,750
malvoyants x tactile	501,750
malvoyants x guidée	456,250
malvoyants x verbale	392,500
voyantsbandés x tactile	740,750
voyantsbandés x guidée	855,750
voyantsbandés x verbale	1177,500

Std Err of LS Mean = 207,865

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Holm-Sidak method):
Overall significance level = 0,05

Comparisons for factor: **type of deficit**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**
voyantsbandés vs. malvoyants	474,500	2,796	0,008	0,009
voyantsbandés vs. congénitaux	371,167	2,187	0,035	0,010
aveuglestardifs vs. malvoyants	271,083	1,597	0,119	0,013
voyantsbandé vs. aveuglestard	203,417	1,199	0,239	0,017
aveuglestard vs. congénitaux	167,750	0,988	0,330	0,025
congénitaux vs. malvoyants	103,333	0,609	0,546	0,050

Comparison	**Significant?**
voyantsbandés vs. malvoyants	Yes
voyantsbandés vs. congénitaux	No
aveuglestardifs vs. malvoyants	No
voyantsbandé vs. aveuglestard	No
aveuglestard vs. congénitaux	No
congénitaux vs. malvoyants	No

Comparisons for factor: **familiarisation**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
verbale vs. tactile	115,563	0,786	0,437	0,017	No
verbale vs. guidée	75,813	0,516	0,609	0,025	No
guidée vs. tactile	39,750	0,270	0,788	0,050	No

Comparisons for factor: **familiarisation within congénitaux**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**
verbale vs. guidée	178,000	0,606	0,549	0,017
verbale vs. tactile	96,500	0,328	0,745	0,025
tactile vs. guidée	81,500	0,277	0,783	0,050

Comparison	**Significant?**

verbale vs. guidée	No
verbale vs. tactile	No
tactile vs. guidée	No

Comparisons for factor: **familiarisation within aveuglestardifs**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**
guidée vs. tactile	171,000	0,582	0,564	0,017
guidée vs. verbale	132,750	0,452	0,654	0,025
verbale vs. tactile	38,250	0,130	0,897	0,050

Comparison	**Significant?**
guidée vs. tactile	No
guidée vs. verbale	No
verbale vs. tactile	No

Comparisons for factor: **familiarisation within malvoyants**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**
tactile vs. verbale	109,250	0,372	0,712	0,017
guidée vs. verbale	63,750	0,217	0,830	0,025
tactile vs. guidée	45,500	0,155	0,878	0,050

Comparison	**Significant?**
tactile vs. verbale	No
guidée vs. verbale	No
tactile vs. guidée	No

Comparisons for factor: **familiarisation within voyantsbandés**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**
verbale vs. tactile	436,750	1,486	0,146	0,017
verbale vs. guidée	321,750	1,095	0,281	0,025
guidée vs. tactile	115,000	0,391	0,698	0,050

Comparison	**Significant?**
verbale vs. tactile	No
verbale vs. guidée	No
guidée vs. tactile	No

Comparisons for factor: **type of deficit within tactile**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**
voyantsbandés vs. malvoyants	239,000	0,813	0,422	0,009
voyantsbandés vs. congénitaux	192,250	0,654	0,517	0,010
aveuglestardifs vs. malvoyants	149,750	0,509	0,614	0,013
aveuglestard vs. congénitaux	103,000	0,350	0,728	0,017
voyantsbandé vs. aveuglestard	89,250	0,304	0,763	0,025
congénitaux vs. malvoyants	46,750	0,159	0,875	0,050

Comparison	Significant?
voyantsbandés vs. malvoyants	No
voyantsbandés vs. congénitaux	No
aveuglestardifs vs. malvoyants	No
aveuglestard vs. congénitaux	No
voyantsbandé vs. aveuglestard	No
congénitaux vs. malvoyants	No

Comparisons for factor: **type of deficit within guidée**

Comparison	Diff of Means	t	Unadjusted P	Critical Level
voyantsbandés vs. malvoyants	399,500	1,359	0,183	0,009
voyantsbandés vs. congénitaux	388,750	1,322	0,194	0,010
aveuglestardifs vs. malvoyants	366,250	1,246	0,221	0,013
aveuglestard vs. congénitaux	355,500	1,209	0,234	0,017
voyantsbandé vs. aveuglestard	33,250	0,113	0,911	0,025
congénitaux vs. malvoyants	10,750	0,0366	0,971	0,050

Comparison	Significant?
voyantsbandés vs. malvoyants	No
voyantsbandés vs. congénitaux	No
aveuglestardifs vs. malvoyants	No
aveuglestard vs. congénitaux	No
voyantsbandé vs. aveuglestard	No
congénitaux vs. malvoyants	No

Comparisons for factor: **type of deficit within verbale**

Comparison	Diff of Means	t	Unadjusted P	Critical Level
voyantsbandés vs. malvoyants	785,000	2,670	0,011	0,009
voyantsbandés vs. congénitaux	532,500	1,811	0,078	0,010
voyantsbandé vs. aveuglestard	487,750	1,659	0,106	0,013
aveuglestardifs vs. malvoyants	297,250	1,011	0,319	0,017
congénitaux vs. malvoyants	252,500	0,859	0,396	0,025
aveuglestard vs. congénitaux	44,750	0,152	0,880	0,050

Comparison	Significant?
voyantsbandés vs. malvoyants	No
voyantsbandés vs. congénitaux	No
voyantsbandé vs. aveuglestard	No
aveuglestardifs vs. malvoyants	No
congénitaux vs. malvoyants	No
aveuglestard vs. congénitaux	No

Two Way Analysis of Variance mercredi, avril 27, 2011, 21:14:18

Data source: Data 1 in BlindData

Balanced Design

Dependent Variable: number of stops

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
type of deficit	3	44,417	14,806	7,560	<0,001
familiarisation	2	3,500	1,750	0,894	0,418
type of deficit x familiarisation	6	16,833	2,806	1,433	0,229
Residual	36	70,500	1,958		
Total	47	135,250	2,878		

The difference in the mean values among the different levels of type of deficit is greater than would be expected by chance after allowing for effects of differences in familiarisation. There is a statistically significant difference (P = <0,001). To isolate which group(s) differ from the others use a multiple comparison procedure.

The difference in the mean values among the different levels of familiarisation is not great enough to exclude the possibility that the difference is just due to random sampling variability after allowing for the effects of differences in type of deficit. There is not a statistically significant difference (P = 0,418).

The effect of different levels of type of deficit does not depend on what level of familiarisation is present. There is not a statistically significant interaction between type of deficit and familiarisation. (P = 0,229)

Power of performed test with alpha = 0,0500: for type of deficit : 0,963
Power of performed test with alpha = 0,0500: for familiarisation : 0,0500
Power of performed test with alpha = 0,0500: for type of deficit x familiarisati : 0,156

Least square means for type of deficit :

Group	Mean
congénitaux	0,750
aveuglestardifs	2,000
malvoyants	0,167
voyantsbandés	2,583

Std Err of LS Mean = 0,404

Least square means for familiarisation :

Group	Mean
tactile	1,000
guidée	1,500
verbale	1,625

Std Err of LS Mean = 0,350

Least square means for type of deficit x familiarisation:

Group	Mean
congénitaux x tactile	0,750

congénitaux x guidée	0,250
congénitaux x verbale	1,250
aveuglestardifs x tactile	2,000
aveuglestardifs x guidée	2,500
aveuglestardifs x verbale	1,500
malvoyants x tactile	0,250
malvoyants x guidée	0,250
malvoyants x verbale	0,000
voyantsbandés x tactile	1,000
voyantsbandés x guidée	3,000
voyantsbandés x verbale	3,750

Std Err of LS Mean = 0,700

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Holm-Sidak method):
Overall significance level = 0,05

Comparisons for factor: **type of deficit**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**
voyantsbandés vs. malvoyants	2,417	4,230	<0,001	0,009
aveuglestardifs vs. malvoyants	1,833	3,209	0,003	0,010
voyantsbandés vs. congénitaux	1,833	3,209	0,003	0,013
aveuglestard vs. congénitaux	1,250	2,188	0,035	0,017
voyantsbandé vs. aveuglestard	0,583	1,021	0,314	0,025
congénitaux vs. malvoyants	0,583	1,021	0,314	0,050

Comparison	**Significant?**
voyantsbandés vs. malvoyants	Yes
aveuglestardifs vs. malvoyants	Yes
voyantsbandés vs. congénitaux	Yes
aveuglestard vs. congénitaux	No
voyantsbandé vs. aveuglestard	No
congénitaux vs. malvoyants	No

Comparisons for factor: **familiarisation**

Comparison	**Diff of Means**	**t**	**Unadjusted P**	**Critical Level**	**Significant?**
verbale vs. tactile	0,625	1,263	0,215	0,017	No
guidée vs. tactile	0,500	1,011	0,319	0,025	No
verbale vs. guidée	0,125	0,253	0,802	0,050	No

Two Way Analysis of Variance mercredi, avril 27, 2011, 22:56:02

Data source: Data 1 in BlindData

Balanced Design

Dependent Variable: distances covered

Equal Variance Test: Passed (P = 0,240)

Source of Variation	**DF**	**SS**	**MS**	**F**	**P**
type of deficit	3	444,500	148,167	0,00171	1,000
familiarisation	2	6520,542	3260,271	0,0376	0,963
type of deficit x familiarisation	6	52465,125	8744,188	0,101	0,996
Residual	36	3124996,500	86805,458		
Total	47	3184426,667	67753,759		

The difference in the mean values among the different levels of type of deficit is not great enough to exclude the possibility that the difference is just due to random sampling variability after allowing for the effects of differences in familiarisation. There is not a statistically significant difference (P = 1,000).

The difference in the mean values among the different levels of familiarisation is not great enough to exclude the possibility that the difference is just due to random sampling variability after allowing for the effects of differences in type of deficit. There is not a statistically significant difference (P = 0,963).

The effect of different levels of type of deficit does not depend on what level of familiarisation is present. There is not a statistically significant interaction between type of deficit and familiarisation. (P = 0,996)

Power of performed test with alpha = 0,0500: for type of deficit : 0,0500
Power of performed test with alpha = 0,0500: for familiarisation : 0,0500
Power of performed test with alpha = 0,0500: for type of deficit x familiarisation: 0,0500

Least square means for type of deficit :

Group	**Mean**
congénitaux	421,000
aveuglestardifs	422,250
malvoyants	416,500
voyantsbandés	424,917

Std Err of LS Mean = 85,052

Least square means for familiarisation:

Group	**Mean**
tactile	431,125
guidée	404,813
verbale	427,563

Std Err of LS Mean = 73,657

Least square means for type of deficit x familiarisation:

Group	**Mean**
congénitaux x tactile	465,750
congénitaux x guidée	386,750
congénitaux x verbale	410,500

aveuglestardifs x tactile	393,250
aveuglestardifs x guidée	451,750
aveuglestardifs x verbale	421,750
malvoyants x tactile	467,000
malvoyants x guidée	392,000
malvoyants x verbale	390,500
voyantsbandés x tactile	398,500
voyantsbandés x guidée	388,750
voyantsbandés x verbale	487,500

Std Err of LS Mean = 147,314

----------ANNEXE 3

----------Liste des publications

A) Publications in international journals and conference proceedings with peer review:

1. **Boumenir, Y.**, Georges, F., Valentin, J., Rebillard, G. & Dresp-Langley, B. **(2010)** To find one's way or not through an unfamiliar urban environment . ***Perceptual & Motor Skills*, 111, 3**, 829-847.

2. Valentin, J., Georges, F., **Boumenir, Y.**, Dresp-Langley, B. **(2011)** Virtual spaces and pre-experience in geographical space. Accepted for publication in NETCOM (publisher's acknowledgement is enclosed).

3. **Boumenir**, Y., Rebillard, G. & Dresp-Langley, B.: Brief visual exposure to spatial layout and navigation from memory through a complex urban environment. Poster to be presented at the 34th European Conference on Visual Perception (**ECVP 11)**. Accepted by the reviewing committee for inclusion in the scientific programme, session "*Learning and Memory 1*", with abstract publication in *Perception* (publisher's acknowledgement is enclosed).

4. **Boumenir**, Y., Rebillard, G., Dresp-Langley, B. (2010). An augmented reality for an augmented spatial orientation. Interdisciplinary Graduate Day (*Doctiss 2010*). LMGC, Montpellier, *France*, June 10.

5. Georges, F., **Boumenir**, Y, Valentin, J., Rebillard, G. & Dresp-Langley, B. (2009). Finding one's way through the Père-Lachaise: encoding spatial information from "augmented" reality. **Communication au Colloque International *Ludovia* 2009:** *Espace et mémoire.* Ax-lès-Thermes, *France*, August 25-27.

6. Valentin, J., Georges, F., **Boumenir**, Y., Dresp-Langley, B. (2010). Virtual spaces and pre-experience in geographical space. International Geographical Union, Israel's National Commission for Geography IGU/UGI Regional Conference. Tel-Aviv, *Israel*, July 12-16.

B) Web publications with post-publication peer-review and ongoing peer-commentary:

1. **Boumenir, Y.**, Rebillard, G. & Dresp-Langley, B. **(2011)** Short-term Memory Representation Of A Complex And Non-familiar Environment After Brief Exposure. WebmedCentral BRAIN, 2 (1): WMC001523.