HAL
open science

Apport de la réalité virtuelle pour la coordination des référentiels spatiaux chez les aveugles : SeaTouch, un logiciel de navigation haptique et auditif pour la préparation d'itinéraire à la voile par les marins non-voyants.

Mathieu Simonnet

To cite this version:

Mathieu Simonnet. Apport de la réalité virtuelle pour la coordination des référentiels spatiaux chez les aveugles : SeaTouch, un logiciel de navigation haptique et auditif pour la préparation d'itinéraire à la voile par les marins non-voyants.. Psychologie. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2008. Français. NNT : . tel-00437301

HAL Id: tel-00437301

https://theses.hal.science/tel-00437301v1

Submitted on 30 Nov 2009

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

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

Thèse

présentée

devant l'Université de Brest

pour obtenir

le grade de Docteur de l'Université de Brest

mention S.T.A.P.S.

par Mathieu Simonnet

Equipe d'accueil : Lisyc Ea 3883 (Ubo, Enib)

Ecole doctorale : SIGMA

Titre de la thèse :

Apport de la réalité virtuelle pour la coordination des référentiels spatiaux chez les aveugles

***SeaTouch*, un logiciel de navigation haptique et auditif pour la préparation d'itinéraire à la voile par les marins non-voyants.**

Soutenue le 21 novembre 2008 devant la commission d'examen :

M.	Jacques Tisseau	Professeur, Enib Brest	*Directeur*
M.	Stéphane Vieilledent	Maître de Conférences, Université de Brest	*Co-encadrant*
Mme.	Florence Gaunet	Chargée de recherche au CNRS, Paris	*Rapporteure*
M.	Yannick Blandin	Professeur, Université de Poitiers	*Rapporteur*
Mme.	Katia Rovira	Maître de Conférences, Université de Rouen	*Examinatrice*
M.	Bernard Simon	Professeur, Université de Brest	*Examinateur*
M.	Jean-Yves Guinard	Maître de Conférences, Université de Brest	*Membre invité*

Résumé

Mots clefs : Espace, référentiel, cécité, réalité virtuelle, haptique, navigation maritime.

Bien que la construction de représentations spatiales provienne du contact sensible des êtres humains avec leur environnement, l'utilisation de la géométrie euclidienne paraît faciliter les raisonnements sur l'espace. Cependant, lors de la navigation, il reste nécessaire de coordonner des représentations spatiales de types égo- et allocentrés pour agir et se situer. Alors que l'absence de vision semble favoriser la construction de représentations spatiales de type égocentré, les cartes en relief couplées à des stratégies d'exploration adaptées offrent aux aveugles la possibilité de percevoir la configuration des éléments de l'environnement dans un référentiel de type allocentré. Cependant, l'actualisation de la position au fur et à mesure des déplacements reste particulièrement difficile. Les techniques de la réalité virtuelle permettent de simuler des navigations en proposant aux sujets non-voyants de s'immerger dans des environnements numériques actualisés en permanence grâce à l'utilisation d'une interface haptique et de la spatialisation du son.

Afin d'atteindre cet objectif, nous avons conçu SeaTouch, un logiciel de navigation haptique et auditif pour la préparation d'itinéraires à la voile des marins non-voyants. Une première expérience compare les représentations spatiales construites par six marins aveugles au cours de l'exploration d'une carte en relief et d'une carte virtuelle de SeaTouch. Les résultats montrent que les représentations spatiales issues des cartes virtuelles sont équivalentes à celles issues des cartes en relief. Les cartes virtuelles permettent donc la construction de représentations spatiales non visuelles. Forts de ce résultat, nous avons cherché à évaluer les intérêts de l'utilisation de la réalité virtuelle, et plus précisément de SeaTouch, pour le transfert d'apprentissage depuis la navigation virtuelle vers la navigation réelle. Nous avons alors testé l'influence des conditions de navigations virtuelles sur la coordination des représentations spatiales de types égo- et allocentrés lorsque « *le voilier se déplace sur la carte* » d'une part, et lorsque « *la carte défile autour du voilier* » d'autre part. L'absence de différence entre ces deux conditions semble révéler une importance primordiale de l'encodage initial de la carte pour le repérage des sujets en cours d'action. Cependant, nous soulevons que les sujets qui semblent s'être perdus au cours de la navigation virtuelle présente des performances très légèrement meilleures lors de la navigation en situation naturelle. L'analyse des mouvements d'exploration sur la carte nous permet de reprendre un modèle de coordination des référentiels spatiaux issu de la littérature existante sur la cécité. Nous le précisons en l'appliquant à la tâche de préparation de navigation à la voile avec les cartes virtuelles de SeaTouch.

Outre les bénéfices immédiats de SeaTouch pour la navigation à la voile des marins aveugles, ce travail apporte de nouveaux éléments de compréhension sur certains mécanismes de la cognition spatiale non visuelle et plus particulièrement sur la coordination des référentiels égo- et allocentrés.

Abstract

Key words : space, frame of reference, blindness, virtual reality, haptic, sailing navigation.

Though construction of spatial representations from physical contact of humans with their environment, the use of Euclidean geometry seems to facilitate mental processing about space. However, navigation takes great advantage of matching ego- and allo-centered spatial frames of reference to move and locate in surroundings. Blindness does not implicate a lack of comprehension of spatial concepts, but it leads people to encounter difficulties in perceiving and updating information about environment. Without visual perceptions, blind people tend to encode spatial relations in an ego-centered spatial frame of reference. On the contrary, tactile maps and appropriate exploration strategies allow them to build the representation of a configuration in an allo-centered spatial frame of reference. However position updating during navigation remains particularly complicated without vision. Virtual reality techniques can provide a virtual environment to manage and explore their surroundings. Haptic and auditory interfaces provide blind people with an immersive virtual navigation experience.

In order to help blind sailors to coordinate ego- and allo-centered spatial frames of reference, we conceived SeaTouch. This haptic and auditory software is adapted to blind sailors to set up and simulate their itineraries before sailing navigation.

In a first condition, we compare spatial representations built by six blind sailors during the exploration of a tactile map and the virtual map of SeaTouch. Results show that these two conditions were equivalent.

In a second experiment, we focused on the conditions which favour the transfer of spatial knowledge from a virtual to a real environment. In this respect, blind sailors performed a virtual navigation in 'Northing mode', where the ship moves on the map, and in 'Heading mode', where the map shifts around the sailboat. No significant difference appears. This reveals that the most important factor for the blind sailors to locate themselves in the real environment is the orientation of the maps during the initial encoding time. However, we noticed that the subjects who got lost in the virtual environment in heading condition slightly improved their performances in the real environment.

The analysis of the exploratory movements on the map are congruent with a previous model of coordination of spatial frames of reference.

Moreover beyond the direct benefits of SeaTouch for the navigation of blind sailors, this study offers some new insight to facilitate understanding of the non visual spatial cognition. More specifically the complex tasks of the coordination of ego and allo-centered spatial frames of reference.

Remerciements

Je tiens sincèrement à remercier les personnes suivantes pour leur contribution à la réussite de cette thèse.

M. Bruno Quellec, dont le bon sens et les convictions ont solidement ancré les ambitions de cette aventure maritime malgré les nombreux bancs de brume rencontrés depuis février 2002.

M. Jean-Yves Guinard, pour m'avoir guidé avec toute la sagesse qui lui est propre depuis le mémoire de maîtrise.

M. Jacques Tisseau, pour son accueil au CERV, son soutien paternel et la confiance témoignée tout au long de ce travail depuis septembre 2004.

M. Stéphane Vieilledent, pour sa disponibilité de tous les instants et son encadrement scientifique de proximité depuis septembre 2006.

Les marins de l'association ORION pour avoir accepté de se livrer à nos nombreuses expériences parfois humides et tardives...

M. Bernard Simon, pour la présidence du jury de cette thèse et pour ses conseils avisés dans mes choix les plus cornéliens.

Mme Florence Gaunet et M. Yannick Blandin d'une part, et Mme. Katia Rovira d'autre part, pour avoir accepté respectivement de rapporter et d'examiner ce travail de thèse ainsi que pour la qualité de leurs critiques.

La société CECIAA qui, en partenariat avec l'ANRT, a permis le financement de cette thèse, et tout particulièrement M. Gilles Candotti pour les conditions de travail auxquelles il m'a permis d'accéder.

Ma Dorade.

Je dédicace enfin ce mémoire à la météorologie brestoise sans qui ce travail n'aurait jamais pu aboutir...

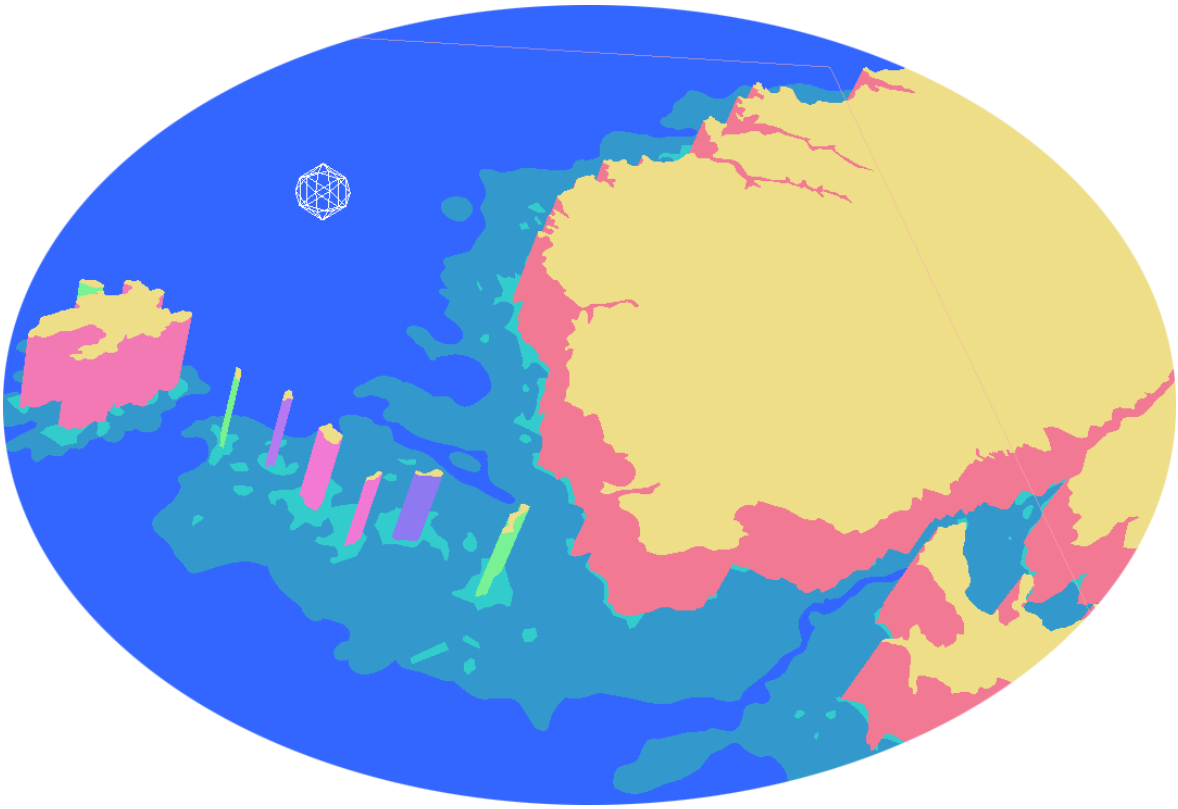


Table des matières

Table des matières **7**

Introduction **19**

I Revue de littérature **23**

1 Espace **25**

1.1 Le concept d'espace 25

1.1.1 L'espace géométrique 25

1.1.2 L'espace vécu 27

1.1.2.1 L'espace corporel 28

1.1.2.2 L'espace proche 29

1.1.2.3 L'espace distant 30

1.1.3 L'espace, l'image et le langage 33

1.1.4 Conclusion sur la formalisation et l'usage 35

1.2 La perception et l'action 35

1.2.1 L'approche indirecte 36

1.2.1.1 La position générale des cognitivistes 36

1.2.1.2 La théorie des schémas 36

1.2.1.3 L'anticipation par simulation mentale 38

1.2.1.4 Le paradigme cognitiviste appliqué à la locomotion 39

1.2.2 L'approche directe 40

1.2.2.1 La position écologique 40

1.2.2.2 La locomotion sans planification 41

1.2.3 Conclusion sur la perception et l'action 43
1.3 Synthèse sur l'espace 44

2 Navigation et Référentiels 47
2.1 La construction de l'espace de navigation 47
2.1.1 Le développement spatial chez les enfants 47
2.1.1.1 La décentration progressive 47
2.1.1.2 Le processus ascendant 48
2.1.1.3 Le processus descendant 49
2.1.2 Les étapes de la navigation chez les adultes 49
2.1.2.1 Les points remarquables ou repères 50
2.1.2.2 Les routes ou représentations de type route 50
2.1.2.3 Les configurations ou représentations de type carte 51
2.1.2.4 Les étapes et leurs mécanismes 52
2.1.3 Les cartes cognitives spatiales 53
2.1.4 Conclusion sur la construction de l'espace de navigation 57
2.2 Les référentiels spatiaux 57
2.2.1 Définition des référentiels spatiaux 57
2.2.1.1 Le referentiel de type égocentré 58
2.2.1.2 Le référentiel de type allocentré 59
2.2.1.3 Les particularités terminologiques 60
2.2.1.4 Le rôle des référentiels spatiaux 61
2.2.2 La nature de l'encodage et l'influence des paramètres 61
2.2.2.1 Les rotations et translations du sujet 62
2.2.2.2 Les mouvements du sujet 63
2.2.2.3 Le point de vue initial d'apprentissage 64
2.2.2.4 La désorientation du sujet 64
2.2.2.5 L'axe intrinsèque à la configuration 66
2.2.2.6 La régularité de la configuration 68
2.2.2.7 Le nombre d'éléments de la configuration 69
2.2.2.8 Une classification des paramètres influençant l'encodage 70
2.2.3 Les modèles de coordination des référentiels spatiaux 72
2.2.3.1 Le modèle de Kosslyn 72
2.2.3.2 Le modèle de Thinus-Blanc 73
2.2.4 Conclusion sur les référentiels spatiaux 74
2.3 Synthèse sur la navigation et les référentiels 75

3 Cécité et Cartographie **77**
3.1 La représentation spatiale sans vision . . . 77
3.1.1 La terminologie . . . 77
3.1.2 De la théorie de la *Déficience* à la théorie de la *Différence* . . . 78
3.1.3 L'assimilation et l'accommodation en situation de cécité . . . 81
3.1.4 Conclusion sur la représentation spatiale sans vision . . . 82
3.2 L'équipement perceptif non visuel . . . 82
3.2.1 La modalité auditive et la construction de l'espace . . . 82
3.2.1.1 La perception de la direction d'une source sonore . . . 83
3.2.1.2 La perception de la distance d'une source sonore . . . 84
3.2.2 La modalité haptique et la construction de l'espace . . . 86
3.2.2.1 L'identification des caractéristiques des objets . . . 86
3.2.2.2 La complémentarité des procédures d'exploration haptique . . . 88
3.2.3 Conclusion sur l'équipement perceptif non visuel . . . 88
3.3 Les stratégies d'exploration et les référentiels . . . 89
3.3.1 La définition des stratégies . . . 90
3.3.2 Le parallèle entre *patterns* haptique et locomoteur . . . 90
3.3.3 Les stratégies d'exploration locomotrice . . . 92
3.3.3.1 Les stratégies de découverte . . . 92
3.3.3.2 Les stratégies d'encodage . . . 92
3.3.4 Les stratégies d'exploration haptiques . . . 94
3.3.5 La coordination des référentiels spatiaux en l'absence de vision . . . 98
3.3.6 Conclusion sur les stratégies d'exploration et les référentiels . . . 100
3.4 L'utilisation des cartes en relief . . . 101
3.4.1 Les cartes en relief . . . 101
3.4.1.1 La conception des cartes en relief . . . 101
3.4.1.2 Le potentiel des cartes en relief . . . 102
3.4.2 Des cartes en relief aux navigations . . . 103
3.4.2.1 Les premiers témoignages de réciprocité . . . 103
3.4.2.2 L'expérience visuelle et les cartes en relief . . . 104
3.4.2.3 Les cartes et l'encodage de configurations simples . . . 105
3.4.2.4 Les cartes et l'encodage des configurations complexes . . . 106
3.4.2.5 Les points de repère pour le positionnement sur la carte . . . 107
3.4.2.6 L'alignement des cartes en relief . . . 108
3.4.2.7 L'utilisation des cartes en relief au quotidien . . . 108
3.4.2.8 La carte comme substitution à la locomotion . . . 109

3.4.3 Conclusion sur l'utilisation des cartes en relief 110
3.5 Synthèse sur la cécité et l'espace géographique 110

4 Réalité virtuelle et navigation 113
4.1 L'immersion en environnement virtuel 113
4.1.1 Le principe 113
4.1.2 La complémentarité interface - programme informatique 115
4.1.3 Conclusion sur l'immersion en environnement virtuel 117
4.2 La navigation virtuelle 117
4.2.1 La multiplication des points de vue 118
4.2.2 La coordination des points de vue 118
4.2.3 Le transfert d'apprentissage en environnement naturel 120
4.2.4 Conclusion sur les environnements virtuels de navigation 121
4.3 La cécité dans les environnements virtuels de navigation 122
4.3.1 Les environnements virtuels auditifs 122
4.3.1.1 Les systèmes de spatialisation du son 122
4.3.1.2 Les différents principes de simulations auditives 124
4.3.1.3 Les applications auditives adaptées aux aveugles 126
4.3.2 Les environnements virtuels haptiques 132
4.3.2.1 Les principes du rendu haptique 132
4.3.2.2 Les interfaces haptiques 135
4.3.2.3 Les environnements haptiques adaptés aux aveugles 138
4.3.3 Conclusion sur la cécité dans les environnements virtuels de navigation 145
4.4 Synthèse sur la réalité virtuelle et la navigation 145

Conclusion de la revue de littérature 147

II Expérimentation 149

5 SeaTouch 151
5.1 Les cartes virtuelles 152
5.1.1 Les cartes haptiques 152
5.1.1.1 Le choix de l'interface haptique 152
5.1.1.2 Le rendu haptique 153
5.1.2 La sonification 153
5.1.3 Les informations et les commandes vocales 154
5.1.3.1 Les informations vocales relatives aux balises 154

5.1.3.2 Le principe des commandes vocales 155
5.1.3.3 La fonctionnalité de la « mesure » 155
5.1.3.4 Les changements d'échelles 155
5.1.3.5 La fonctionnalité de déplacement de la carte 156
5.2 La navigation virtuelle 156
5.2.1 Le bateau virtuel 156
5.2.1.1 Le bateau virtuel et sa recherche guidée 156
5.2.1.2 Les déplacements du bateau 156
5.2.2 Les sons spatialisés du vent et des bouées 157
5.2.2.1 La réification du vent 157
5.2.2.2 La présence des balises 158
5.2.3 Les informations vocales de navigation virtuelle 158
5.3 SeaTouch embarqué 159
5.4 SeaTouch et les référentiels spatiaux 159
5.4.1 Les unités de navigation 160
5.4.1.1 Dans un référentiel de type égocentré 160
5.4.1.2 Dans un référentiel de type allocentré 160
5.4.2 L'orientation de la carte haptique en navigation virtuelle 160
5.4.2.1 La navigation virtuelle en mode *Northing* 160
5.4.2.2 La navigation virtuelle en mode *Heading* 161
5.4.3 Synthèse sur les conditions d'utilisation et les référentiels 161

6 Méthodologie générale 165
6.1 Les sujets 166
6.2 La phase d'apprentissage 166
6.2.1 Les configurations 166
6.2.2 L'enregistrement des *patterns* d'exploration 167
6.3 La phase de restitution des apprentissages 168
6.3.1 Un outil de mesure : le rapporteur breton 168
6.3.2 Les questions alignées et non alignées 169
6.3.2.1 Les questions alignées 169
6.3.2.2 Les questions non alignées 170
6.3.3 Le recueil de données 171
6.4 Le traitement des données 171
6.4.1 Le niveau des directions 172
6.4.2 Le niveau des localisations 172

6.4.2.1 La distance d'erreur de la localisation cognitive (Dte) 173
6.4.2.2 L'aire du triangle d'erreur (Ate) 173
6.4.3 Le niveau des configurations 174
6.4.3.1 Le coefficient de corrélation entre deux configurations (r) 174
6.4.3.2 L'indice de distorsion (DI) 175

7 Méthode de l'expérience de cartographie 177
7.1 Les cartes 177
7.1.1 La carte virtuelle (CVi) 178
7.1.2 La carte en relief (CeR) 178
7.1.3 La description vocale (CVo) 179
7.2 La familiarisation avec les outils 180
7.2.1 L'habitude des cartes en relief 180
7.2.2 Les descriptions verbales quotidiennes 180
7.2.3 L'entrainement avec SeaTouch 181
7.2.4 L'entraînement avec le rapporteur breton 181
7.3 Le déroulement de l'expérience 182
7.4 Le recueil de données 183

8 Résultats de l'expérience de cartographie 185
8.1 L'alignement 186
8.1.1 Niveau des directions 186
8.1.2 Niveau des localisations 187
8.1.2.1 Les erreurs de distance (Dte) 187
8.1.2.2 Les aires des triangles d'erreurs (Ate) 187
8.1.3 Niveau des configurations 188
8.1.3.1 Le coefficient de corrélation (r) 188
8.1.3.2 La distorsion (DI) 189
8.1.4 Synthèse sur l'alignement 190
8.2 Les conditions d'exploration 190
8.2.1 Niveau des directions 190
8.2.2 Niveau des localisations 191
8.2.2.1 Les erreurs de distance (Dte) 191
8.2.2.2 Les aires des triangles d'erreurs (Ate) 192
8.2.3 Niveau des configurations 193
8.2.3.1 Le coefficient de corrélation (r) 193
8.2.3.2 La distorsion (DI) 194

8.2.4 Synthèse sur les conditions d'exploration 194
8.3 Les interactions entre les conditions et l'alignement 195
8.3.1 Niveau des directions 195
8.3.2 Niveau des localisations 196
8.3.2.1 Les erreurs de distances (Dte) 196
8.3.2.2 Les triangles d'erreur (Ate) 196
8.3.3 Niveau des configurations 197
8.3.3.1 Le coefficient de corrélation (r) 197
8.3.3.2 L'index de distorsion (DI) 197
8.3.4 Synthèse sur les conditions et l'alignement 198
8.3.4.1 Les conditions en situation alignée 198
8.3.4.2 Les conditions en situation non alignée 198
8.3.4.3 L'alignement des questions en CeR 199
8.3.4.4 L'alignement des questions en CVi 199
8.3.4.5 L'alignement des questions en CVo 200
8.4 Les conditions en fonction des sujets 201
8.4.1 Niveau des directions 202
8.4.2 Niveau des localisations 202
8.5 Les conditions et l'alignement en fonction des sujets 203
8.5.1 En situation alignée 204
8.5.1.1 Niveau des directions 204
8.5.1.2 Niveau des localisations 204
8.5.2 En situation non alignée 205
8.5.2.1 Niveau des directions 205
8.5.2.2 Niveau des localisations 205
8.6 Les performances des sujets en CVi 206
8.6.1 Indications sur les performances individuelles en situation alignée 206
8.6.2 Indications sur les performances individuelles en situation non alignée 207
8.7 Conclusion sur résultats de l'expérience de cartographie 208

9 Explorations cartographiques 209
9.1 La phase de recherche 210
9.2 La phase de mémorisation 212
9.3 Les performances et les types de référentiels des *patterns* 216
9.4 Conclusion sur les patterns d'exploration 218

10 Discussion de l'expérience de cartographie **219**
10.1 Les paramètres influents des différentes conditions 220
10.1.1 La séquentialité 220
10.1.2 Le périmètre 221
10.1.3 La verticalité 222
10.1.4 Synthèse sur les paramètres influents des différentes conditions 223
10.2 Les sujets face à la carte virtuelle de SeaTouch 223
10.2.1 Les résultats individuels 223
10.2.2 Les significations des temps et distances d'exploration 224
10.2.3 Les interprétations des *patterns* d'exploration en CVi 224
10.2.3.1 Le sujet 1 224
10.2.3.2 Les sujets 2 et 3 225
10.2.3.3 Le sujet 4 225
10.2.3.4 Le sujet 5 225
10.2.3.5 Le sujet 6 226
10.2.3.6 Synthèse sur les interprétations des *patterns* d'exploration 226
10.2.4 L'efficacité de la stratégie du point central de référence... 227
10.2.4.1 ... Pour l'inférence spatiale en générale 227
10.2.4.2 ... pour la rotation mentale en particulier 228
10.2.5 La nouvelle stratégie de la recherche d'axe intrinsèque à la configuration 229
10.2.6 Synthèse sur la carte virtuelle de SeaTouch 230
10.3 Conclusion de la discussion sur l'expérience cartographique 230

11 Méthode de l'expérience de navigation **231**
11.1 Les cartes des navigations virtuelles 233
11.2 La familiarisation avec les navigations virtuelles 233
11.3 Le déroulement de l'expérience de navigation 234
11.3.1 Les tâches préalables 234
11.3.1.1 La découverte de la carte 235
11.3.1.2 La préparation du carnet de route 235
11.3.2 Les tâches d'apprentissage 238
11.3.2.1 La navigation virtuelle en mode *Northing* (NO) 241
11.3.2.2 La navigation virtuelle en mode *Heading* (HE 241
11.3.2.3 L'entraînement aux questions situées. 242
11.3.3 Les tâches de restitution des apprentissages 243
11.3.3.1 Les questions alignées et non alignées 243

11.3.3.2 La navigation en situation naturelle et les questions situées 243

12 Résultats après la navigation virtuelle 249

12.1 L'alignement 249

12.1.1 Niveau des directions 250

12.1.2 Niveau des localisations 250

12.1.2.1 Les erreurs de distance (Dte) 250

12.1.2.2 Les aires des triangles d'erreurs (Ate) 251

12.1.3 Niveau des configurations 252

12.1.3.1 Le coefficient de corrélation (r) 252

12.1.3.2 La distorsion (DI) 252

12.1.4 Synthèse sur l'alignement 253

12.2 Les modes de navigation virtuelle 254

12.2.1 Niveau des directions 254

12.2.2 Niveau des localisations 254

12.2.2.1 Les erreurs de distance (Dte) 254

12.2.2.2 Les aires des triangles d'erreurs (Ate) 255

12.2.3 Niveau des configurations 256

12.2.3.1 Le coefficient de corrélation (r) 256

12.2.3.2 La distorsion (DI) 256

12.2.4 Synthèse sur les modes de navigation virtuelle 257

12.3 Les interactions entre les modes de navigation virtuelle et l'alignement 258

12.3.1 Niveau des directions 258

12.3.2 Niveau des localisations 259

12.3.2.1 Les erreurs de distances (Dte) 259

12.3.2.2 Les triangles d'erreur (Ate) 259

12.3.3 Le niveau des configurations 260

12.3.3.1 Le coefficient de corrélation (r) 260

12.3.3.2 La distorsion (DI) 260

12.3.4 Synthèse sur les interactions entre les modes de navigation et l'alignement . . . 261

12.3.4.1 Les modes de navigation en situation alignée 261

12.3.4.2 Les modes de navigation en situation non alignée 261

12.4 Les interactions entre les navigations et l'alignement par sujets 262

12.4.1 En situation alignée 262

12.4.1.1 Niveau des directions 262

12.4.1.2 Niveau des localisations 262

12.4.2 En situation non alignée . . . 263
12.4.3 Synthèse sur les interactions entre les navigations et l'alignement par sujets . . 263
12.5 Conclusion sur les réponses aux questions de l'expérience de navigation . . . 264

13 Résultats en navigation réelle 265
13.1 Les modes de navigations virtuelles . . . 265
13.1.1 Le niveau des directions . . . 265
13.1.2 Le niveau des localisations . . . 267
13.1.2.1 Les erreurs de distance (Dte) . . . 267
13.1.2.2 Les triangles d'erreur (Ate) . . . 267
13.1.3 Synthèse sur les modes de navigation virtuelle . . . 268
13.2 Les modes de navigation virtuelle en fonction des sujets . . . 269
13.2.1 Le niveau des directions . . . 269
13.2.2 Le niveau des localisations . . . 270
13.2.2.1 Les erreurs de distances (Dte) . . . 270
13.2.2.2 Les aires des triangles d'erreurs (Ate) . . . 271
13.2.3 Synthèse sur les modes de navigation virtuelle en fonction des sujets . . . 272
13.3 Conclusion sur les réponses aux questions situées . . . 272

14 Explorations et navigations 273
14.1 Analyse individuelle . . . 273
14.1.1 Le sujet 1 . . . 274
14.1.2 Le sujet 2 . . . 276
14.1.3 Le sujet 3 . . . 278
14.1.4 Le sujet 4 . . . 280
14.1.5 Le sujet 5 . . . 282
14.2 Analyse générale . . . 284
14.2.1 Les distances parcourues avec le phantom . . . 284
14.2.2 La navigation de « proche en proche » et les écarts par rapport à la route . . . 284
14.3 Synthèse sur les *patterns* d'explorations des navigations . . . 285

15 Discussion sur l'expérience de navigation 287
15.1 Réaliser un itinéraire et se repérer . . . 288
15.1.1 L'absence de vision et l'actualisation de la position . . . 288
15.1.2 La confrontation à une double tâche . . . 289
15.1.3 Synthèse sur la réalisation d'apprentissage et le repérage sans vision . . . 290
15.2 Le repérage et la désorientation . . . 290

15.2.1 Précisions sur la tâche de repérage 290
15.2.2 Suggestion sur l'intéret de la désorientation 291
15.2.3 Synthèse sur la désorientation 292
15.3 Conclusion de la discussion sur l'expérience de navigation 293

Discussion générale **297**

Bibliographie **307**

Introduction

Depuis 1992, l'association internationale Blindsailing a pour objet la promotion de la pratique de la voile pour les déficients visuels. Actuellement, près d'un millier de personnes aveugles ou amblyopes s'adonnent aux plaisirs des sensations de glisse pour barrer et régler les voiliers dans différents pays du monde. Si un système de bouées sonores permet aux personnes privées de la vue de régater sur de petits espaces, certains marins atteints de cécité souhaitent aller plus loin et n'hésitent pas à prendre la mer pour traverser des océans entiers. Par exemple, en 1998, le sud africain Geoff Hilton-Barber a traversé l'océan indien en autonomie complète grâce à un répétiteur d'informations (cap, vitesse, position,...) par synthèse vocale. Bien qu'il s'agisse d'un véritable exploit, le départ et l'arrivée ont nécessité l'intervention de marins voyants et soulignent les limites des navigateurs non-voyants aux abords des côtes.

Depuis 2002, en France, les marins déficients visuels de l'association Orion sillonnent la mer d'Iroise située à la pointe du Finistère (29). Au fur et à mesure des navigations, ils ont manifesté la volonté d'utiliser des cartes géographiques en relief et de maîtriser eux-mêmes leurs itinéraires. Cependant ces cartes en relief ne permettent que la navigation à l'estime, autrement dit la position du voilier n'est pas actualisée pendant le déplacement. Un paradoxe est apparu : à l'heure où les systèmes d'informations géographiques maritimes prolifèrent grâce aux G.P.S. (système de positionnement par satellites) et aux logiciels (*Maxsea*, *Memory Map*, ...), il n'existe que très peu de matériel adapté au handicap visuel, à l'exception de la confection d'une carte maritime en relief par l'association des Glénans dans les années 80 et de la vocalisation de quelques informations de navigation à bord du voilier privé de Geoff Hilton-Barber juste avant l'an 2000. Dans ce contexte l'entreprise Ceciaa, le Laboratoire d'Informatique des Systèmes Complexes (L.I.S.y.C.), le Centre Européen de Réalité Virtuelle (C.E.R.V.) et l'association Orion ont affiché leur volonté d'aller plus loin. A travers ce travail de thèse, nous cherchons donc à étudier comment la réalité virtuelle pourrait aider les

marins non-voyants à maîtriser l'espace géographique au cours de navigations à la voile. Pour atteindre cet objectif, nous avons conçu un logiciel multi-modal nommé SeaTouch. Ce dernier vise à permettre aux marins non-voyants d'explorer des cartes géographiques numériques et de réaliser des navigations virtuelles à la voile avant de larguer les amarres. Nous cherchons donc à quelles conditions cet outil, conçu pour l'entraînement à la cartographie maritime non visuelle, peut faciliter la navigation à la voile en situation bien réelle.

Avant que le lecteur ne s'aventure dans ce mémoire de thèse, nous souhaitons clarifier le terme de *navigation*. Bien que le premier sens de ce mot désigne la conduite d'un navire, aujourd'hui, il peut s'appliquer à l'ensemble des tâches spatiales quotidiennes consistant à trouver son chemin dans l'environnement. Puisque notre objet d'étude est l'activité de « navigation » dans la « navigation à la voile », nous nous devons de préciser ces définitions. Rappelons que parmi les équipiers embarqués nous distinguons le *navigateur* des autres. Ainsi, à notre sens, le seul et unique *navigateur* est celui dont le poste est de se repérer en mer. A bord, ce dernier joue donc essentiellement un rôle de repérage cartographique. Il prend des informations sur les éléments de l'environnement et donne des consignes sur les caps à suivre. Les autres équipiers sont barreur, régleur de voile, cuisinier ou encore pêcheur et ne s'intéressent à la carte que pour assouvir leur curiosité. Bien sûr, à bord de « petits bateaux » la même personne peut assurer plusieurs fonctions.

Les études sur les processus cognitifs qui régissent la navigation des personnes non-voyantes en environnement maritime naturel ou virtuel se révèlent absentes de la littérature scientifique. Cette recherche s'appuie donc sur les éclairages théoriques des différentes questions qui gravitent autour de l'espace, de la cognition spatiale, de la spécificité de la cécité et du transfert d'apprentissage depuis les environnements virtuels vers les situations naturelles.

Comment l'Homme se représente-t-il l'espace ?

Comment apprend-t-il à naviguer et à coordonner les différents points de vue ?

Que connaît-on de cet apprentissage lorsque la modalité visuelle est absente de l'équipement perceptif des individus ?

En quoi le domaine de la réalité virtuelle est-il susceptible de présenter un intérêt pour l'acquisition de connaissances spatiales non visuelles utilisables en situation naturelle ?

Autant de questions que nous aborderons afin de préciser le cadre théorique spécifique auquel nous nous référerons pour étudier les éventuels apports de SeaTouch pour la navigation des marins non-voyants.

La première partie présente donc une revue de littérature déclinant ces différentes questions.

En premier lieu, nous introduirons la formalisation géométrique de la représentation spatiale et les rapports entre corps et espace. Nous évoquerons ici les débats autour du rôle de la représentation dans la perception et l'action.

Par la suite, nous nous intéresserons aux processus de construction des représentations spatiales et présenterons les deux principaux référentiels dans lesquels elles s'inscrivent. Nous considérerons alors les mécanismes de leur coordination.

Une fois ces notions précisées, nous étudierons les capacités des aveugles à raisonner sur l'espace. Afin de mieux comprendre comment ils actualisent leur représentation, nous identifierons les différentes stratégies d'exploration et leurs référentiels spatiaux respectifs. Nous examinerons alors les conditions d'utilisation des cartes en relief pour la navigation non visuelle.

Finalement, nous introduirons les principes de la réalité virtuelle et les enjeux qu'elle représente pour des transferts d'apprentissage relatifs à la navigation. Afin de mieux cerner les possibilités offertes aux aveugles pour interagir avec les applications informatiques, nous présenterons ensuite les différentes interfaces auditives et haptiques. Nous soulignerons alors le potentiel des environnements virtuels de navigation pour aider les personnes aveugles à coordonner les référentiels spatiaux.

La seconde partie présentera SeaTouch, une application de notre conception, ainsi que nos expériences de cartographie et de navigation visant à évaluer ce nouvel outil et préciser ses conditions d'utilisation.

Dans un premier temps, nous détaillerons les principes et les fonctionnalités de SeaTouch. Cette application s'appuie sur les modalités haptique et auditive pour la navigation à la voile des marins aveugles en environnement virtuel. Les conditions de présentation des informations en fonction des différents référentiels spatiaux pour les transferts depuis le virtuel vers le réel se révéleront au cœur de nos préoccupations.

Nous exposerons ensuite la méthodologie générale utilisée pour l'évaluation des représentations issues de l'exploration des différentes cartes et des navigations virtuelles avec SeaTouch. Nous présenterons ici comment nous mesurerons et analyserons les représentations spatiales et les stratégies d'exploration des marins aveugles.

Nous préciserons alors la méthodologie spécifique de notre expérience de cartographie où nous comparerons les représentations spatiales construites à partir d'une carte virtuelle de SeaTouch et celles obtenues avec une carte en relief classique et une description verbale.

Après une présentation de l'analyse statistique des résultats d'estimations de directions recueillies pour chacune des conditions, nous nous intéresserons aux différentes stratégies mises en œuvre au cours des explorations de la carte haptique et auditive de SeaTouch et les mettrons en relation avec les performances réalisées par chacun des sujets.

Nous discuterons alors des relations entre les stratégies et des capacités des sujets à coordonner les représentations issues des différents référentiels spatiaux au cours de cette expérience de cartographie.

Après cette première expérience de cartographie, nous présenterons la méthodologie spécifique utilisée lors de notre expérience de navigation. Au cours de cette seconde expérience, nous évaluerons

les représentations spatiales construites lors des navigations virtuelles et les transferts d'apprentissage effectués depuis l'environnement de SeaTouch vers le milieu marin réel. Plus précisément, nous comparerons les performances réalisées au cours d'une tâche de repérage à la suite de simulations de navigation. Dans une première condition, le voilier se déplace sur la carte virtuelle (mode *Northing*). Dans une seconde condition, cette carte virtuelle tourne et défile autour du voilier (mode *Heading*).

Après une présentation des résultats recueillis à la suite des navigations virtuelles, puis en situation naturelle, nous nous intéresserons aux différentes stratégies d'exploration mises en œuvre au cours des navigations virtuelles avec SeaTouch. Nous les mettrons en lien avec les résultats obtenus.

Nous discuterons alors des relations entre ces stratégies et les capacités des sujets à coordonner les représentations issues des différents référentiels spatiaux au cours de cette expérience de navigation. Nous examinerons également l'influence des modes *Northing* et *Heading* des navigations virtuelles pour les transferts d'apprentissage vers une tâche de repérage en situation réelle.

En dernier lieu, nous discuterons d'une façon plus générale des apports d'un tel outil de réalité virtuelle pour l'apprentissage de l'espace et de la navigation en situation de cécité. Nous préciserons par ailleurs les perspectives de recherche qui en découlent.

Première partie

Revue de littérature

Chapitre 1

Espace

La notion d'espace est omniprésente. Le quotidien des êtres vivants ne peut se soustraire à cette réalité. Ainsi, avant de nous intéresser aux processus de construction de sa représentation, nous nous interrogeons sur sa formalisation et sur ses relations avec la perception et l'action.

1.1 Le concept d'espace

De quels moyens l'Homme dispose-t-il pour raisonner sur l'espace ? L'espace vécu est-il identique à l'espace formalisé ?

Quelles sont les contraintes des différents types d'espace dans lesquels l'Homme évolue ?

Comment se représente-t-on l'espace ?

1.1.1 L'espace géométrique

Communément, la géométrie peut être définie comme la science qui formalise l'espace. L'espace géométrique d'Euclide est caractérisé par cinq propriétés. Tout d'abord, il comporte trois dimensions. Ensuite, il est continu, infini et homogène. Ce dernier terme indique que tous ses points sont identiques entre eux. Finalement, le « postulat des parallèles » décrit un espace isotrope, c'est-à-dire que toutes les droites qui passent par un même point sont identiques entre elles. D'après Poincaré (1902), « notre esprit s'est adapté aux conditions du monde extérieur par sélection naturelle et a ainsi adopté la géométrie euclidienne car c'est la plus avantageuse à notre espèce (p.49) ». En effet, cette géométrie, par rapport aux géométries hyperbolique de Gauss ou encore elliptique de Riemann, affirme sa particularité sur la cinquième propriété de l'espace géométrique (le postulat de parallèles). Poincaré considère que la vérification de théorèmes tels que Thalès ou Pythagore favorise notre raisonnement sur l'espace alors que leur réfutation complique l'élaboration d'une représentation spatiale. En effet, l'« espace représentatif » est issu de nos sensations et de nos perceptions. Les espaces géométrique et

représentatif se distinguent donc dans leur finalité. Là où le premier s'inscrit dans une recherche du général, de l'universel, le second est au service de notre quotidien. Autrement dit, l'un est cognitif, logique, descriptif ; l'autre est perceptif, sensoriel, sensible. Ainsi, « nous ne nous représentons pas les corps extérieurs dans l'espace géométrique, mais nous raisonnons sur ces corps comme s'ils étaient situés dans l'espace géométrique » (Poincaré, 1895). A l'inverse, Hilbert (1902) affirme que l'espace géométrique est une construction de l'Homme dont l'objet est la dissociation la plus stricte entre les lois mathématiques d'une part, et les sensations humaines d'autre part. Partisan de la position de Poincaré, le mathématicien contemporain, Kahane (2002), voit la géométrie comme « le lieu où l'on apprend à appréhender l'espace (p.92) », soit une mise en exergue des relations qui existent entre les notions et les sensations. En effet, les raisonnements spatiaux de l'Homme nécessite d'utiliser quotidiennement une géométrie. Par exemple, lors de description d'itinéraires ou de formes, nous faisons volontiers appel au système métrique. D'un point de vue psychologique, Piaget et Inhelder (1948) définissent l'aboutissement du développement spatial par l'atteinte du stade des « opérations abstraites » (ou formelles) permettant de concevoir une représentation de l'espace. Plus précisément, la construction d'un espace euclidien est dérivée d'un « espace topologique » fondé sur de simples relations de voisinage, de séparation, d'ordre, d'entourage et de continuité. Tout comme Poincaré, Piaget envisage les propriétés euclidiennes des représentations spatiales comme un moyen de raisonner sur l'espace avec le plus de proximité (ou le moins d'écart) entre l'environnement physique et son intériorisation mentale. En ce sens, nous ne devrions pas parler d'un espace représentatif euclidien mais plutôt d'un espace représentatif *pseudo-euclidien*.

La géométrie euclidienne permettrait donc à l'homme de formaliser l'espace. Le plan cartésien en est une illustration. Prenons l'exemple des cartes marines dans la projection de Mercator, c'est-à-dire un planisphère de la terre. Sur de petites distances, les trajets (ou routes) sont majoritairement représentés selon le principe de la *loxodromie*, c'est-à-dire qu'il n'est pas tenu compte de la rotondité de la terre. Ainsi, la réalisation du trajet le plus court entre deux points est une ligne droite ; ceci implique le maintien d'un cap constant. En réalité, la route la plus courte est *orthodromique*, c'est-à-dire qu'elle épouse la courbure de la surface terrestre. Ainsi, la réalisation de cette courbe nécessite des changements de caps réguliers. D'un point de vue fonctionnel, le gain obtenu par une telle route sur un petit espace est trop minime pour qu'il soit intéressant de chercher à atteindre cette précision géométrique. Cependant, lorsqu'il s'agit de traverser l'Atlantique, le respect de la route orthodromique est à la fois plus rentable, avec un gain de 150 kilomètres sur 6000, et plus facile à respecter à raison de changements de cap à intervalles plus espacés, tous les 500 kilomètres par exemple (*cf.* figure 1.1). Nous adaptons donc la géométrie selon nos besoins pratiques.

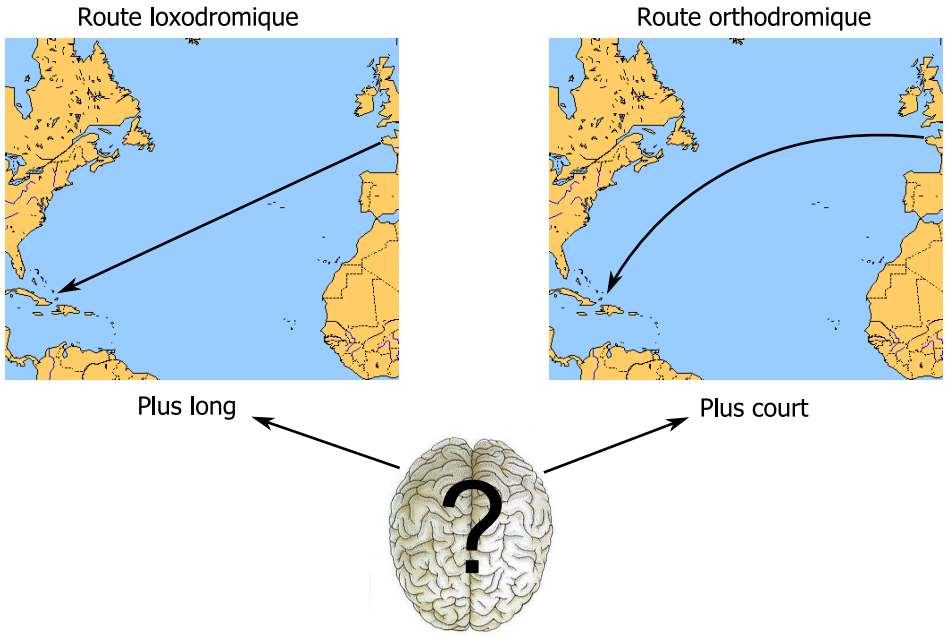


Figure 1.1 – Routes *loxodromique* et *orthodromique*. La première ne tient pas compte de la rotondité de la terre à l'inverse de la seconde. Bien que la représentation de Mercator (projection plane de la pseudo sphère terrestre) offre l'impression que la distance parcourue par une trajectoire courbe est plus longue, il s'agit en réalité de la route la plus courte car elle épouse la courbure de la surface terrestre.

1.1.2 L'espace vécu

Il semble que chaque individu vive l'espace différemment et que nos possibilités d'action conditionnent notre conception de l'espace et *vice-versa*. Ainsi, pour le philosophe Bergson (1896), l'espace est le « schéma de notre action possible sur les choses ». Par exemple, là où un rond-point peut paraître infranchissable à une personne non-voyante à cause d'un trafic important auquel s'ajoute une configuration spatiale complexe, le piéton voyant et pressé peut traverser en diagonale en mettant à profit un espace précis et temporairement favorable. A l'inverse, pour un marin aveugle de Brest, les îles Scilly peuvent être englobées dans un espace accessible, défini et ininterrompu alors qu'un individu voyant strictement terrien pourra considérer cette portion d'océan comme infranchissable.

L'espace dans lequel nous vivons peut-être divisé en trois (*cf.* figure 1.2). Tout d'abord, l'espace du corps est délimité par le revêtement cutané. Ensuite l'espace proche concerne les points que l'organisme peut atteindre sans activité locomotrice. Il est également appelé espace « de préhension » par Piaget et Inhelder (1948) et Hatwell (1986), espace « de manipulation » par Millar (1994), Gaunet *et al.* (1997) et Lederman *et al.* (1987), espace « autour du corps » par Tversky (2003), et encore espace « péri-corporel » (Coluccia *et al.*, 2007). Finalement, l'espace distant est l'espace hors d'atteinte sans activité locomotrice (Honoré *et al.*, 2002). Un parallèle peut être fait entre les es-

paces distant et « de navigation ». En effet de nombreux auteurs (Golledge, 1987; Gallistel, 1990; Loomis *et al.*, 1993; Klatzky, 1998) parlent d'espace de navigation pour désigner l'étendue spatiale qui nécessite un déplacement du corps entier pour être parcourue. Lederman *et al.* (1987) parlent encore d'espace « de déambulation ».

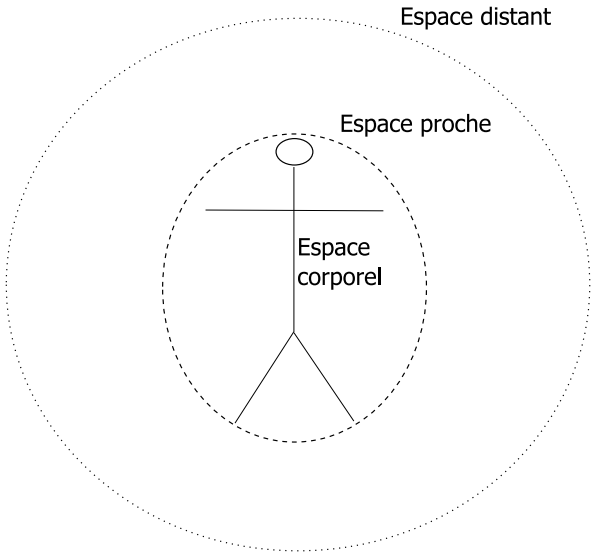


Figure 1.2 – Les trois espaces vécus de l'Homme.

1.1.2.1 L'espace corporel

Trois théories expliquent différemment la représentation de notre espace corporel. La théorie de l'importance de la taille des parties du corps (jambes, bras, tronc ...) avance qu'il s'agit d'une image mentale dont les caractéristiques géométriques respectent strictement les dimensions physiques (Kosslyn, 1976). En quelque sorte, notre représentation corporelle se confondrait avec une planche d'anatomie. A l'inverse, la théorie de l'importance de la saillance perceptive stipule que cette image mentale diffère de la réalité physique au profit de la proéminence remarquable des différentes parties du corps (Biederman, 1987). Selon cette théorie, la main serait bien plus largement représentée que le dos car l'extrémité de notre bras apparaît presque constamment et bien distinctement dans notre champ visuel contrairement à notre dos. Finalement, selon la théorie de l'importance fonctionnelle nous accorderions aux différentes parties de notre corps des places plus ou moins grandes dans notre représentation en fonction de leur capacité à agir pour notre survie (Tversky et Hemenway, 1984). Le besoin alimentaire étant primaire et récurrent, notre bouche prendrait ici une place prioritaire. Afin de vérifier ces positions théoriques, Tversky *et al.* (2002) réalisent une expérience au cours de laquelle sont mesurés les temps de réaction nécessaires aux sujets pour reconnaître si un stimulus (image ou mot) représente une partie du corps ou non. Les réponses concernant la main sont toujours plus rapidement données que celle concernant la cuisse par exemple. Ainsi, il est montré que l'importance

fonctionnelle et la saillance perceptive dominent sur la taille. Ces résultats peuvent être illustrés par la célèbre représentation du cortex sensorimoteur humain appelé *Homonculus* (*cf.* figure 1.3). Ainsi, notre représentation corporelle semble différer des caractéristiques géométriques de notre morphologie.

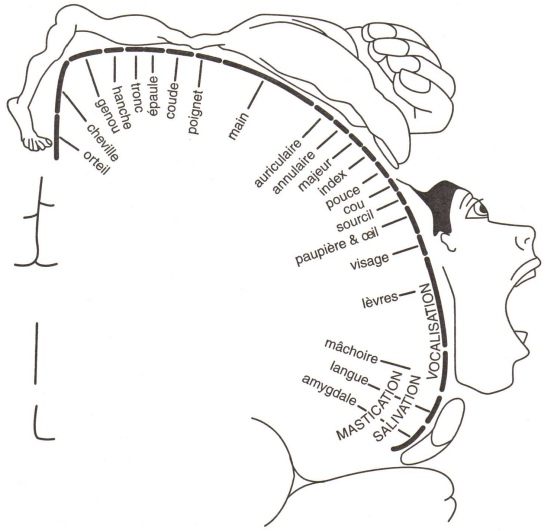


Figure 1.3 – *Homonculus* moteur. Illustration graphique de l'importance de la représentation des différentes parties du corps dans le cortex sensorimoteur. Plus le dessin d'une partie est grand, plus l'aire corticale attribuée à celle-ci est étendue. Cette représentation graphique s'accorde avec les temps de réaction recueillis par Tversky *et al.* (2002). Ainsi, plus le temps nécessaire à la reconnaissance d'une image d'une partie du corps est petit, plus l'aire corticale associée est importante et plus notre représentation de cette partie du corps est développée.

1.1.2.2 L'espace proche

Si nous considérions l'espace proche comme une forme approximativement sphérique dont le rayon ferait la taille de notre bras et dont notre nombril serait le centre, alors tout point se trouvant à l'intérieur de cet espace serait également accessible. Cependant, il est bien moins aisé d'accéder à une fermeture-éclair située dans le dos que juste sur le torse. Quand Millar (1994), Gaunet *et al.* (1997), Tversky (2003) ou Berthoz (2005) parlent d'espaces de préhension, de manipulation ou d'espace autour du corps, ils désignent celui dans lequel ces actions se déroulent. Aussi, bien que nous puissions décrire l'espace proche comme la sorte de sphère mentionnée ci-dessus, nous devons prendre en compte les caractéristiques morphologiques et biomécaniques de notre organisme. La zone se trouvant en avant de notre plan frontal est donc mieux représentée que celle se trouvant en arrière de ce plan. De la même manière, pour le droitier, l'espace de préhension se trouvant à sa droite n'est pas équivalent à celui se trouvant à sa gauche. Une expérience de Bryant *et al.* (1992) permet de préciser la représentation de l'espace proche et d'en identifier les déterminants. Ici, les sujets lisent une description des directions (droite, gauche, devant, derrière, en haut, en bas) de six objets répartis dans leur espace proche. Les

sujets doivent ensuite indiquer le plus rapidement possible quel objet se trouve dans chacune des directions annoncées par l'expérimentateur. La mesure des temps de réaction montre que les sujets répondent plus rapidement lorsque la description de l'emplacement d'un objet se trouve située devant eux plutôt que derrière eux. Ces résultats s'accordent avec ceux de Franklin et Tversky (1990) et Bryant et Tversky (1999) qui montrent l'existence d'une corrélation entre les espaces fonctionnels et représentés. A partir de ce constat, Tversky (2003) évoque la théorie des « cadres de référence » selon laquelle, dans l'espace proche où se distinguent les axes avant/arrière, tête/pied et gauche/droite, l'accessibilité d'un axe détermine l'importance de la représentation des éléments qui y sont situés. D'après ces auteurs, nous intériorisons plus largement les espaces que nous occupons. Ainsi, les espaces de préhension et de manipulation désignent la partie de l'espace proche la plus représentée, tant du point de vue sensorimoteur que du point de vue cognitif.

1.1.2.3 L'espace distant

L'espace distant se confond avec l'espace de navigation. En raison de notre impossibilité à l'englober d'un seul coup d'œil, Tversky (2003) explique que nous devons déplacer notre corps entier pour percevoir l'espace distant. Lynch (1960), Downs et Stea (1977) et Kuipers (1978) considèrent qu'un espace de navigation est petit lorsque l'on peut percevoir sa totalité depuis un point de vue unique (une pièce, par exemple) et qu'il est grand quand il ne peut être perçu sans locomotion (une ville, par exemple). De son côté, Siegel (1981) considère que seule la carte permet la représentation unifiée des espaces les plus grands. En effet, la seule expérience directe ne permet pas la construction d'un schéma mental représentant un pays, par exemple. Dans cette continuité, Montello et Pick (1993) définissent deux types d'espace de navigation. L'espace *environnemental* est appréhendé à partir de l'expérience directe et se compose des relations entre les éléments alentours au fur et à mesure de la locomotion (maison, quartier, villes...) alors que l'espace *géographique*, beaucoup plus vaste, ne peut pas être perçu par l'expérience directe et nécessite l'utilisation de cartes (région, pays, monde, système solaire,...). D'une façon plus détaillée encore Freundschuh et Egenhofer (1997) proposent une classification de l'espace qui incluent six types d'espace différents. Les critères de classement sont fonction des possibilités de manipulation des éléments de l'espace, de la nécessité de locomotion pour percevoir l'espace, et de la taille de l'espace (*cf.* tableau 1.1).

Types d'espace	Description	Locomotion
Espace d'objets manipulables	Comprend des objets plus petits que le corps humain qui peuvent être attrapés et tournés, mais ne nécessitent pas de locomotion pour les atteindre.	–
Espace d'objets non manipulables	Comprend des objets qui ne sont pas manipulables, généralement plus grands que le corps humain mais plus petits qu'une maison. Il nécessite la locomotion pour être perçu en entier.	+
Espace environnemental	Nécessite de se déplacer pour le percevoir et s'apprend au fur et à mesure des expériences.	++
Espace géographique	Très large (pays, univers), il ne peut être perçu entièrement en raison de limitations pratiques même en se déplaçant.	–
Espace panoramique	Petit ou grand, il comporte un point de vue supérieur permettant de percevoir sa globalité en balayant et scrutant l'espace.	–
Espace de la carte	Peut potentiellement inclure tout espace en créant des représentations des grands espaces sur des supports plus petits. Ce sont des représentations symboliques qui sont le résultat de la généralisation cartographique visant à simplifier l'information spatiale.	–

Tableau 1.1 – Classification des différents types d'espaces selon Freundschuh et Egenhofer (1997). A l'exception de l'espace d'objets manipulables qui appartient à l'espace proche, les espaces suivants définissent différents espaces de navigation.

La représentation de l'espace distant présente donc la particularité de « se prolonger au-delà de nos sens », soit parce que nous mémorisons nos perceptions lors de nos déplacements, soit parce que nous avons consulté une carte géographique. D'un point de vue psychologique, Hatwell et Martinez-Sarocchi (2000) définissent « les cartes comme des représentations symboliques bidimensionnelles, de taille réduite, d'un espace réel. Elles donnent une vue d'ensemble d'espaces vastes (une ville) ou réduits (la salle de classe). Ce mode d'archivage de l'information géographique, vieux de plus de six mille ans, a l'intérêt de rendre perceptible ce qui ne l'est pas (p.267) ». La carte a donc ce pouvoir de

représenter l'espace distant dans notre espace proche *via* un changement d'échelle. En géographie, une petite échelle désigne la représentation d'un vaste environnement sur une petite carte. A l'inverse, une grande échelle correspond à la représentation d'un espace plus réduit sur une carte de même dimension (Freundschuh, 2000). Ainsi, l'échelle 1 : 1 conserve les distances absolues entre la carte et l'environnement alors que l'échelle 1 : 2 divise toutes les distances par deux. L'appropriation de l'échelle de la carte est primordiale pour son utilisation dans l'environnement. Au cours d'une expérience, Thorndyke et Hayes-Roth (1982) comparent les espaces construits par des sujets ayant appris un quartier d'une ville à partir d'une carte ou de la locomotion. Les résultats montrent que les sujets ayant appris l'espace au moyen de l'expérience directe évaluent mieux la direction des éléments alors que les sujets ayant utilisé la carte présentent des estimations de distance et des localisations d'éléments remarquables plus précises. Il semble donc que la locomotion aide à construire l'*espace environnemental* alors que la carte permet de construire l'*espace de la carte* (Freundschuh et Egenhofer, 1997). D'après Lloyd (1989), les individus construisent leur représentation de l'espace de navigation selon deux types de processus. Le premier est ascendant (*bottom-up*) et implique une découverte de l'environnement à partir de l'expérience directe. La représentation spatiale qui en découle est plutôt fonctionnelle. A l'inverse, le second processus est descendant (*top-down*) et implique la lecture de carte (*cf.* figure 1.4). Ici la représentation spatiale qui en découle est plus proche de la géométrie. Pour Lloyd (1989), le travail du cartographe consiste à concevoir des cartes dont la représentation symbolique et géométrique traduit également un aspect fonctionnel de la façon la plus intuitive possible.

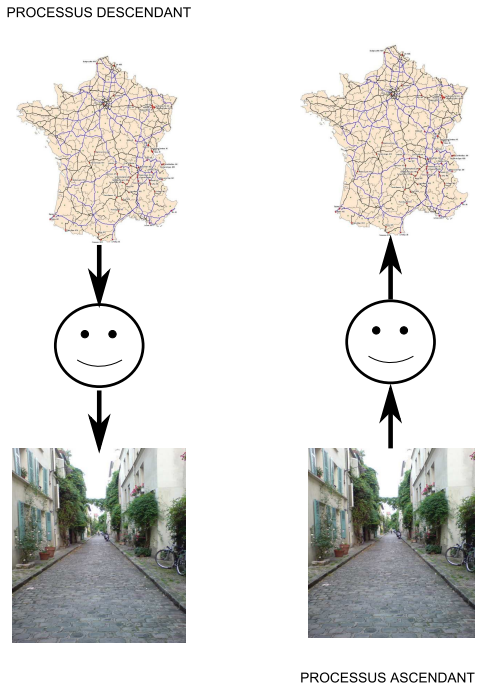


Figure 1.4 – Processus descendant et ascendant. Dans le premier cas, le sujet se déplace dans l'environnement grâce aux connaissances spatiales fournies par la carte ; dans le second cas, le sujet construit la carte à partir des connaissances élaborées en cours de déplacement.

1.1.3 L'espace, l'image et le langage

Bien que les cartes géographiques incarnent l'archétype de la représentation spatiale, il existe également différentes manières de décrire l'espace au moyen du langage. Par exemple, avant une régate côtière, le discours du navigateur pourra être le suivant : « Après le départ nous irons jusqu'à la balise jaune et noire du *Renard* que nous laisserons à tribord, puis nous continuerons jusqu'à la balise rouge *Pénoupèle* que nous laisserons également à tribord avant de redescendre à la balise de *Kéraliou* que nous laisserons cette fois à bâbord ». Pour ce même parcours, le navigateur peut également annoncer : « Nous partirons au sud-ouest pendant deux milles (nautiques), puis nous naviguerons vers le nord-ouest pendant deux milles et demi avant de remonter vers le nord-est pendant plus de trois milles ». Si nous considérons que les équipiers ne connaissent pas la carte et ne situent donc pas les balises, il y a de fortes chances pour que la première description donne lieu à la rétention d'une liste de langage (description par des mots), là où la seconde permet la construction d'une image (sorte de représentation graphique mentale) (*cf.* figure 1.5).

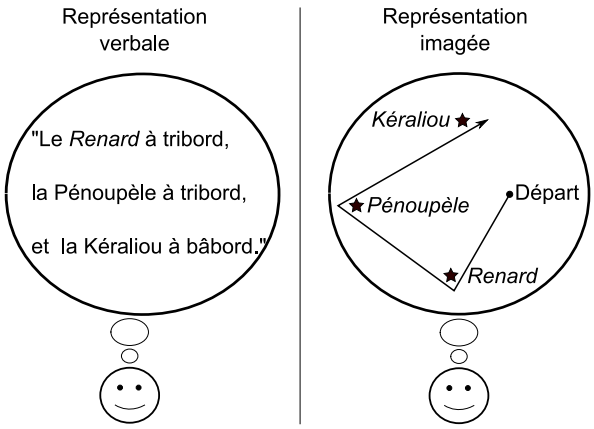


Figure 1.5 – Exemple de deux « représentations spatiales » du même parcours de régate en fonction de deux discours différents. A gauche, une liste de langage, à droite, une représentation imagée.

Dans le paradigme cognitiviste, toute représentation mentale est construite sous forme propositionnelle. Cependant, un certain nombre de travaux ont tenté de montrer la spécificité des représentations imagées.

Ces dernières décennies, la question de la nature imagée ou propositionnelle a occasionné un débat théorique assez virulent principalement entretenu par Pylyshyn et Kosslyn. Partant du constat que toutes les informations peuvent être exprimées, Pylyshyn (1973) défend l'idée que les représentations stockées en mémoire sont amodales et peuvent toujours être exprimées par le langage. A l'inverse, Kosslyn (1976) soutient la thèse d'une analogie entre les propriétés des images mentales et celles des objets physiques. La position de cet auteur est célèbre notamment grâce à une expérience au cours de laquelle il demande aux sujets d'apprendre le plan d'une île comportant des éléments remarquables. Une fois la carte retirée, il est demandé aux sujets d'imaginer qu'un insecte parcourt la distance entre les différents points de l'île. Les résultats de cette expérience révèlent une proportionnalité remarquable entre les temps de réponses et les distances effectives entre les points (Kosslyn *et al.*, 1978). Au cours de nombreuses recherches, cet auteur a utilisé la méthode de l'inspection visuelle et révéler un fort isomorphisme entre espace mental et espace physique. Récemment encore, Pylyshyn et Kosslyn s'opposent. Ainsi, alors que Pylyshyn (2003) soutient que les images sont des objets auxquels nous pensons et non la forme de nos pensées, Kosslyn *et al.* (2003) répondent que « notre esprit utilise l'espace pour représenter l'espace ». Par ailleurs, pour répondre à la critique de Pylyshyn (2003) selon laquelle l'utilisation d'image mentale ne serait qu'une simulation de ce que les sujets voudraient voir, Kosslyn *et al.* (2003) s'appuient sur une expérience d'Arditi *et al.* (1988) où il est demandé à des sujets non-voyants de pointer précisément les limites droite et gauche d'objets qu'ils doivent imaginer à trois distances différentes. Les résultats de cette expérience montrent que si les sujets non-voyants n'utilisent pas les lois de la perspective visuelle comme le font les voyants, ces derniers identifient bien la droite et la gauche des objets imaginés. Ainsi, Pour Arditi *et al.* (1988), les caractéristiques spatiales de la

représentation mentale ne sont pas uniquement liées à des souvenirs ou des anticipations visuelles. Finalement, des résultats plus récents obtenus au moyen de l'imagerie par résonance magnétique (I.R.M.) montrent que des cartes de l'activité neuronale du lobe occipital présentent elles-mêmes des propriétés géométriques analogues à celles de l'environnement visuel du sujet (Kosslyn, 1995, 1996).

Si des représentations imagées sont identifiées, cela n'implique pas qu'il n'existe pas de représentations verbales. D'ailleurs, Pylyshyn (2003) nuance son discours en admettant que nous ne pouvons pas vraiment savoir quelle sorte de représentation est utilisée en imagerie mentale. Plus récemment, Denis et Cocude (1997) avancent que les représentations de nature imagée et propositionnelle, bien que de nature fondamentalement différente, pourraient coexister. En effet, « alors que le système de l'imagerie mentale produit et manipule des représentations qui conservent les relations topologiques (relations de voisinage, de proximité,...) incluant les propriétés métriques parfois, le système linguistique utilise des symboles arbitraires et génère des représentations linéaires » (Denis et Cocude, 1997). Autrement dit, ces deux types de représentation seraient complémentaires. Dans ce sens, Robin et Denis (1991), par exemple, montrent qu'il est tout à fait possible de faire une description verbale correctement structurée à partir d'une simple image visuelle. Les représentations imagées et verbales pourraient donc s'articuler efficacement.

1.1.4 Conclusion sur la formalisation et l'usage

En résumé, la géométrie formalise les relations spatiales. Parmi les différentes conceptions géométriques de l'espace, la géométrie euclidienne est un moyen privilégié pour raisonner sur l'espace avec plus de proximité. Cependant, les individus agissent et réfléchissent dans différents espaces dont les caractéristiques fonctionnelles sont définies par des contraintes issues de leur morphologie, de leur équipement sensoriel et de leurs intentions d'action. Ainsi, l'articulation entre la formalisation et les usages spatiaux utilisent des processus ascendant et descendant pour associer les représentations imagées ou propositionnelles aux possibilités d'action de chaque individu.

1.2 La perception et l'action

Comment l'homme interagit-il avec l'environnement pour réaliser des actions efficaces ?

Doit-il avoir une représentation mentale générale de l'environnement (approche indirecte) ou bien posséder des boucles stimulus réponses (approche directe) ?

1.2.1 L'approche indirecte

1.2.1.1 La position générale des cognitivistes

Depuis Helmholtz (1954), qui définit le processus perceptif comme une inférence inconsciente, c'est-à-dire une déduction mentale, la majorité des psychologues cognitivistes (Piaget, 1961; Marr, 1982; Rock, 1997) postulent que l'intervention de processus mentaux nous permet de reconstruire le réel. L'efficacité de l'action sur le monde extérieur dépendrait de la qualité de la représentation au monde.

Ainsi, d'après la position cognitiviste, nous ne percevons pas directement les informations pertinentes dans l'environnement mais nous interprétons des sensations afin de leur attribuer une signification. Paillard (1994) définit ces représentations comme « le substrat du modèle interne de la réalité que construit le sujet dans ses mémoires (p.926) ».

Cette représentation « s'améliore » par l'expérience acquise par le sujet qui agit sur son environnement. Ce sont les représentations qui guident les actions. Ces relations actions-représentations peuvent s'illustrer par la théorie des schémas.

1.2.1.2 La théorie des schémas

Reprenant la *théorie des schémas* de Bartlett (1932), Schmidt (1975) propose la *théorie des schémas moteurs* qui introduit la notion de « programmes moteurs généralisés (P.M.G.) ». En effet, les P.M.G sont comparables à des programmes d'ordinateur dont les symboles, en fonction d'un code, permettent de planifier et réaliser l'action. Plus précisément, ces programmes sont organisés en catégories adaptables en fonction des caractéristiques de la situation (Schmidt et Young, 1987; Shea et Wulf, 2005). Chaque P.M.G. comporte des invariants, caractéristiques générales et abstraites, et des paramètres spécifiques, caractéristiques variables (force, amplitude,...). Par exemple, lorsqu'un marin réalise un nœud de chaise, l'invariant du P.M.G. est constitué par le *pattern* sensorimoteur coordonnant les muscles des membres supérieurs, alors que les paramètres spécifiques fluctuent en fonction du diamètre du cordage et de la taille de l'œillet de la voile. Ici, chaque mouvement entraîne l'encodage d'informations abstraites en fonction de la perception de l'action réalisée. Ainsi, d'après la *théorie des schémas*, la relation entre l'action et la perception repose sur les feedbacks, c'est-à-dire sur les informations que nous obtenons en retour de nos actions (*cf.* figure 1.6).

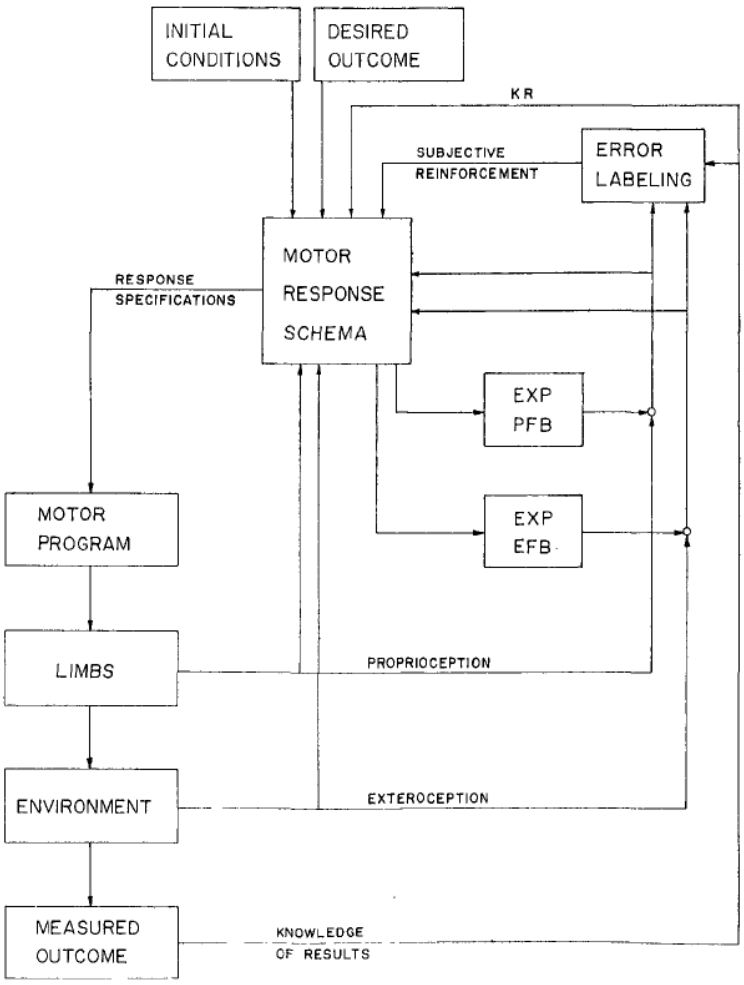


FIGURE 1.6 – Schéma de la mise en œuvre des programmes moteurs généralisés selon Schmidt (1975). Les conditions initiales (*initial conditions*) et l'état désiré (*desired outcome*) sont à l'origine de l'activité. Ceux-ci sollicitent des P.M.G. (*motor response schema*). Une fois le schéma adapté à l'écart entre les états actuels et visés, il donne lieu à un programme moteur (*motor program*) qui active les muscles effecteurs (*limbs*). A la suite de son interaction avec l'environnement le sujet perçoit son état (*measured outcome*). Ces perceptions font l'objet d'attentes de feedbacks proprioceptifs (*EXP EFB*) et extéroceptifs (*EXP EFB*) permettant de réguler l'activité du sujet grâce à un comparateur (*error labelling*). Un nouveau programme moteur est ainsi activé et le cycle reprend.

Cependant, à la lumière des travaux concernant les apprentissages moteurs par répétition mentale, la distance par rapport à l'action peut être augmentée (Sherwood et Lee, 2003). En effet, la recherche dans le monde du sport a largement démontré l'efficacité d'un entraînement sollicitant des images du mouvement par répétition mentale sans nécessité de feedbacks immédiats (Feltz et Landers, 1983; Orlick et Partington, 1986; Denis *et al.*, 1989; Jeannerod, 1994; Roure *et al.*, 1999; McCullagh et Weiss, 2001). En particulier, il apparaît clairement que l'imagerie mentale est une technique efficace pour

l'apprentissage moteur (Guillot et Collet, 2005).

1.2.1.3 L'anticipation par simulation mentale

Accordant une grande importance à la simulation mentale pour l'anticipation des conséquences sensorielles de l'action, Berthoz (1997) conçoit la « la perception comme une action simulée (p.17) ». Afin d'expliquer l'importance de l'anticipation et de la simulation interne dans la perception et l'action, Berthoz (2005) s'appuie sur le concept de résonance de Shepard et Hurwitz (1984) : « par suite de l'évolution biologique et de l'apprentissage individuel, l'organisme est à tout moment accordé pour résonner à des patterns qui correspondent aux invariants qui sont signifiants pour lui ». Selon ce principe, les individus réagissent selon les interactions entre des ensemble de stimuli et leurs attentes. Ici les attentes sont des représentations extraites de la simulation. En d'autre termes, nous percevons ce que nous nous attendons à percevoir ou ce que nous sommes prêts à percevoir.

D'après Wolpert et Flanagan (2001), la prédiction peut être définie comme l'estimation des états futurs d'un système. Ainsi, la prédiction des conséquences d'une commande motrice dans un environnement complexe nécessite un système qui soit en mesure de simuler le comportement dynamique de notre corps dans l'environnement. Plus précisément, Wolpert et Kawato (1998) proposent la notion de modèle interne du contrôle moteur articulant processus directs (*forward model*) et inverses (*inverse model*). Pour ces auteurs, le contrôle et l'apprentissage moteur sont régis par des paires constituées d'attentes sensorimotrices et de sensations effectives. Ainsi, notre système nerveux central s'enrichit au fur et à mesure de notre expérience de couple d'informations proactives et rétroactives. La particularité de ce modèle computationnel réside dans l'activation parallèle de différentes paires. Ainsi, le rôle central du comparateur est d'intégrer et interpréter l'ensemble des attentes et des retours pour permettre une adéquation entre les programmes moteurs disponibles et l'environnement. En résumé, pour Wolpert et Flanagan (2001), nous ajustons autant nos actions en fonction de nos attentes sensorimotrices (modèle direct), qu'en fonction de nos sensations actuelles (modèle inverse). (*cf.* figure 1.7).

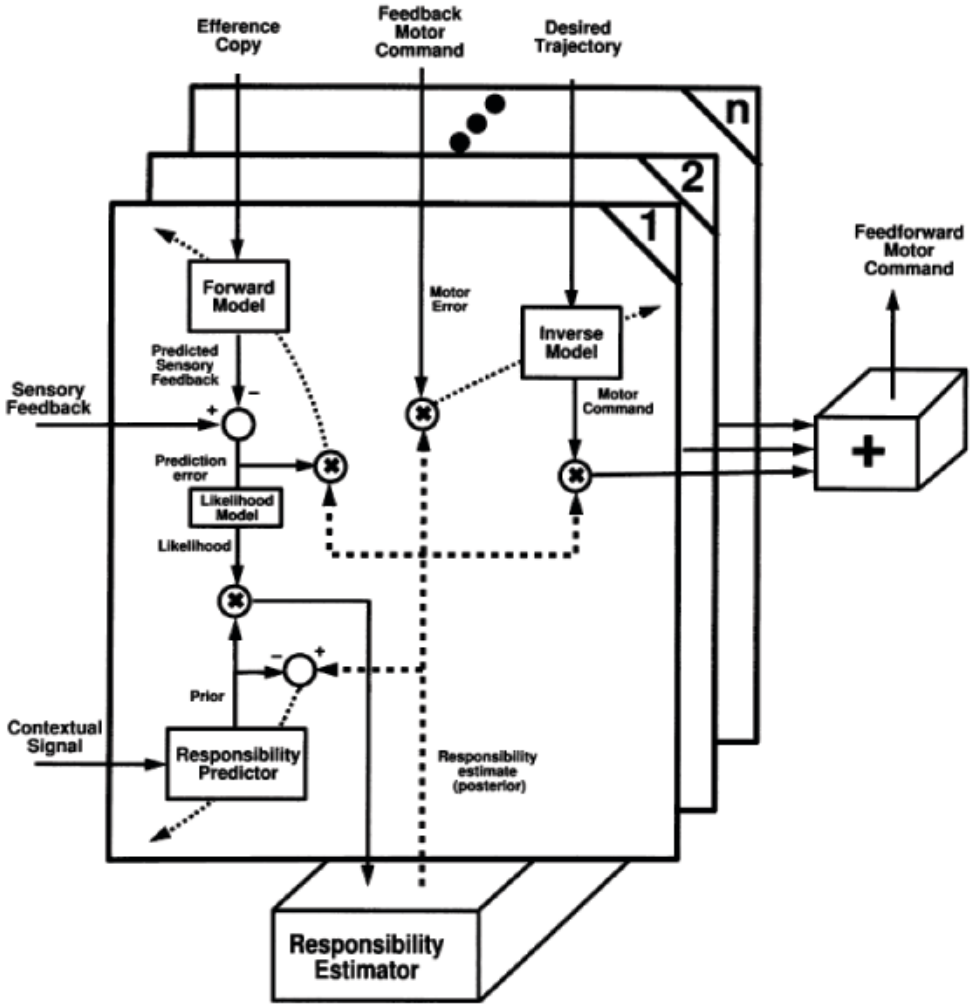


FIGURE 1.7 – Fonctionnement parallèle des systèmes directs (*forward model*) et inverses (*inverse model*) du modèle interne de Wolpert et Kawato (1998). Respectant la logique computationnelle, chaque paire directe et inverse implique un fonctionnement perception - action - feedback en série. Cependant, « n » paires sont sollicitées en parallèle afin d'alimenter un comparateur général (*responsability estimator*) permettant l'intégration de l'ensemble des attentes et des retours. Les actions réalisées seront la résultante de la somme de l'ensemble des paires. Le rôle central du comparateur dans la régulation de l'action est matérialisée sur ce schéma par les flèches en pointillés.

1.2.1.4 Le paradigme cognitiviste appliqué à la locomotion

Plus récemment, dans le domaine de la locomotion, Hicheur *et al.* (2007) et Pham *et al.* (2007) réalisent une expérience où ils demandent à leurs sujets de marcher dans une pièce pour atteindre une porte visible. Outre la recherche de régularités dans les trajectoires locomotrices des différents sujets, les auteurs comparent ces résultats à ceux des trajectoires manuelles enregistrées lors d'une expérience précédente (Hicheur *et al.*, 2005). Les résultats révèlent que les mêmes modèles prédisent

de façon relativement précises les trajectoires manuelles et locomotrices produites par les sujets. Ainsi, la planification et le contrôle de nos actions seraient gérés par le système nerveux central indépendamment des muscles effecteurs impliqués. Les auteurs défendent l'existence d'un processus interne constitué par un comparateur d'ordre supérieur pouvant utiliser des stratégies communes lors de différentes actions.

En résumé, l'approche cognitiviste indirecte consiste à penser que l'Homme agit à partir de représentation du réel. Son expérience lui permettrait d'appliquer des schémas généraux à des représentations de situations particulières. Dans l'approche computationnelle « notre esprit lit la sémantique de nos représentations symboliques. Ces représentations symboliques sous-tendent l'exécution de notre activité dirigée par nos buts (p.9) » (Williams *et al.*, 1999). Cette explication nécessite donc qu'il existe des représentations au départ. Dennett (1978) soulève le problème de la « régression infinie ». En effet, si la perception des actions est réalisée grâce à des représentations, et que les ces dernières reposent sur la régulation de la perception des mouvements, l'origine de ces processus devient alors problématique.

1.2.2 L'approche directe

1.2.2.1 La position écologique

Selon une position complètement opposée, l'approche écologique de Gibson défend l'idée d'une perception directe en introduisant le concept d'*affordance* (Gibson, 1977). Suivant ce concept nous percevons l'environnement directement en fonction de notre capacité à agir sur ses propriétés. Autrement dit, il existerait des relations entre l'individu et l'environnement qui « affordent » (ou permettent) telles ou telles interactions. Par exemple, lorsqu'une personne marche sur un sentier côtier, elle perçoit directement qu'elle ne peut ni évoluer sur la falaise côté terre, ni sur l'estran côté mer. L'affordance n'est pas le chemin en lui-même mais l'interaction qui existe entre cette personne et le chemin. En ce sens, il n'est pas nécessaire que l'individu ait une représentation propre au sentier. Ainsi, l'approche écologique de Gibson rejette la notion de représentation.

Dans le cadre de cette approche, l'action et la perception sont indissociables. Gibson (1979) avance que « nous devons percevoir pour bouger, mais nous devons aussi bouger pour percevoir (p.223) ». Une étude de Kugler et Turvey (1987), explique que la perception et l'action se déterminent mutuellement selon un principe de causalité circulaire et sont considérées comme deux modes complémentaires de couplage : un couplage à basse énergie entre l'action et la perception et un couplage à haute énergie entre la perception et l'action » (*cf.* figure 1.8). La notion d'énergie peut être définie ici comme l'importance d'un stimulus par rapport à l'activité et l'intégrité d'un individu.

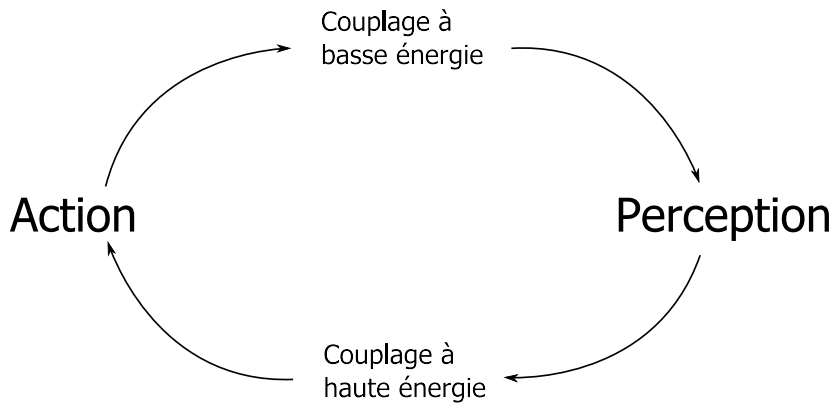


Figure 1.8 – Le cycle perception-action (Kugler et Turvey, 1987).

Ainsi, l'information serait contenue dans la structure de l'environnement (visuel, tactile, auditif...) et non dans la stimulation du récepteur. Lorsqu'un projectile se dirige vers la tête d'un individu par exemple, le système environnement-individu crée un couplage visuel à haute énergie, une action est alors déclenchée (ici « baisser la tête » peut se révéler approprié). A l'inverse, l'exploration tactilo-kinesthésique d'une carte en relief par un individu non-voyant est un système individu-environnement entraînant un couplage issu du mouvement à basse énergie ne déclenchant pas d'autres actions que les mouvements perceptifs eux-mêmes.

1.2.2.2 La locomotion sans planification

Dans les années 80, l'approche dynamique, refusant également la notion de représentation, reprend ces couplages pour proposer une nouvelle approche organisant la perception-action selon le principe d'oscillations dynamiques (Kelso *et al.*, 1986). Ici, les mouvements sont vus comme des variables comportant deux types de paramètres : ceux d'ordre pour l'action, et ceux de contrôle pour la perception. L'intérêt de cette approche est qu'elle propose une dynamique commune, ou langage commun, pour les activité de contrôle du corps ou de coordination des sensations, formant ainsi un tout cohérent.

Récemment, Warren (2006) a proposé une synthèse des comportements dynamiques. Son objectif est également de comprendre comment des comportements adaptés peuvent émerger des interactions dynamiques entre un organisme et son environnement, et plus particulièrement comment le contrôle visuel permet la locomotion et la navigation. Ici les régularités physiques et informationnelles sont envisagées comme des champs de force attracteurs ou répulseurs. Autrement dit, les différents éléments de l'environnement sont divisés en buts et en obstacles. L'incarnation physique du corps dans l'environnement est un premier niveau de contrainte (« *embodiement* »). Dans un second niveau, les informations (ou champs de force) disponibles dans l'environnement conditionnent l'existence de différentes solutions stables, constituants une autre forme de contrainte (« *information based-control* »). Au troisième niveau, en fonction de la tâche (ou de l'intention), l'individu opte pour une solution

demandant le moins de représentation interne possible, c'est-à-dire la plus économique. Finalement, le comportement émerge des interactions entre l'individu et l'environnement sous les contraintes physiques et informationnelles de la tâche (« *emergent* »). Pour les activités de locomotion et de navigation, Warren (2006) illustre sa position théorique par une équation différentielle visant la modélisation et la prédiction des itinéraires en environnement complexe. Cette équation comprend la position et la direction de l'individu (« *embodiement* »), la position du but et des obstacles (« *information based-control* »), la distance et l'orientation du but à atteindre (« *task-specificity* ») et finalement les vitesses et accélérations (« *emergent* »).

Fajen et Warren (2003) démontrent le caractère applicatif de cette position au cours d'une tâche de locomotion en environnement virtuel. Dans une pièce vide de douze mètres sur douze, les sujets portent un casque de simulation visuelle d'un espace virtuel comportant des buts et des obstacles. Les expérimentateurs demandent aux sujets d'atteindre les buts en évitant les obstacles. Au cours de trois expériences, ils enregistrent les positions successives des sujets et des objets. Dans une première expérience, ils font varier la position relative du but. Dans une seconde, des obstacles apparaissent au fur et à mesure des déplacements. Ici, les auteurs identifient effectivement des régularités mathématiques quant aux trajectoires des sujets par rapport aux objets. Au cours d'une troisième expérience, Fajen et Warren (2003) s'intéressent à une situation se rapprochant plus de la navigation que de la simple locomotion. Ici, la disposition de l'obstacle et du but laissent volontairement le choix entre des itinéraires passant « par la droite » ou « par la gauche » pour atteindre l'arrivée. L'objectif de cette situation est d'évaluer si l'on peut prédire les trajectoires des sujets à l'aide des régularités mises à jour au cours des expériences précédentes alors que l'obstacle n'apparaît qu'en cours de locomotion. Les résultats allant dans ce sens, les auteurs suggèrent que la sélection des trajectoires ne nécessite pas de planification mais émerge de régularités physiques et informationnelles. Fajen et Warren (2003) rappellent que leur expérience ne fait intervenir qu'un seul obstacle et un seul but et émettent des réserves quant à des configurations plus complexes se rapprochant plus des situations rencontrées en environnements naturels. De futurs travaux sont donc nécessaires pour évaluer les représentations au cours des navigations. Cependant, d'après ces résultats, Warren (2006) émet l'hypothèse qu'une route, succession de segments, résulte des interactions entre des champs de force de l'environnement sans nécessairement faire appel à une planification antérieure.

S'interrogeant sur l'intériorisation d'une représentation spatiale euclidienne lors du parcours de trajets composés de successions de segments, Foo *et al.* (2005) réalisent une expérience où ils demandent à leurs sujets d'apprendre à réaliser des raccourcis pour revenir à leur point de départ après l'exécution d'un itinéraire composé de deux segments. Afin d'évaluer l'existence de représentations internes globales ou d'interactions directes avec les éléments de l'environnement, les « mondes virtuels » dans lesquels évoluent les sujets sont soit déserts, soit pourvus de points remarquables, soit peuplés de points remarquables qui changent de positions à chaque essais (*cf.* figure 1.9).

Au cours des tâches de locomotion et de repérage, les raccourcis des sujets se révèlent moins efficaces en l'absence de points remarquables ou lorsque ceux-ci ne sont pas fiables (positions aléatoires). De plus, les estimations de distances et de directions des positions des points de départ sont moins précises que les parcours effectifs. S'appuyant sur les travaux de Gallistel (1990) qui explique qu'une représentation spatiale de type euclidienne s'accompagne nécessairement de la capacité à réaliser des estimations précises, les auteurs interprètent que les sujets ne construisent pas de telles représentations. Ainsi, Foo *et al.* (2005) s'accordent avec Fajen et Warren (2003) pour dire que les individus interagissent directement avec l'environnement selon le principe des champs répulseurs et attracteurs. Ces résultats suggèrent donc une interaction directe de l'individu avec l'environnement.

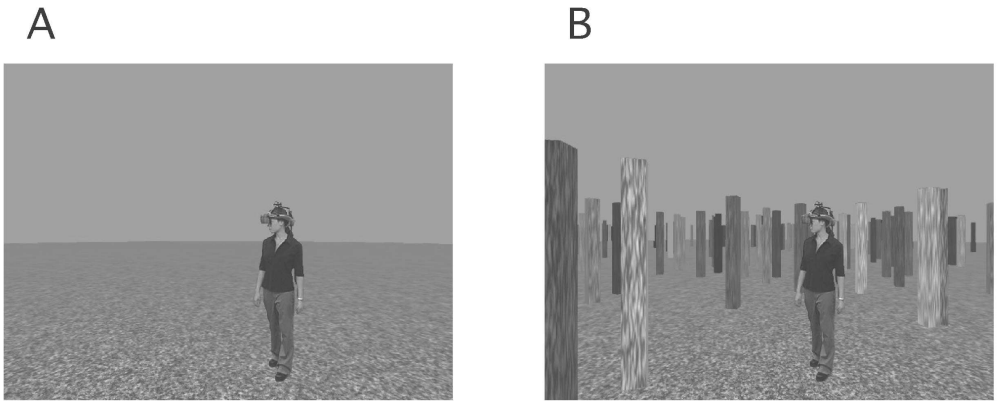


Figure 1.9 – Les environnements virtuels de Foo *et al.* (2005). Les sujets perçoivent les informations visuelles grâce à des lunettes de simulation, sorte de casque comportant des écrans miniatures. La figure A représente le « désert », soit un environnement sans point remarquable. Le sujet ne peut donc se représenter l'espace qu'à partir de ses déplacements. La figure B illustre la « forêt », soit un environnement pourvu de nombreux points remarquables (les arbres) que les sujets peuvent utiliser comme des points de repères. En plus de ces deux environnements, les auteurs immergent les sujets dans un troisième « monde » où les positions des points remarquables sont aléatoires. Autrement dit, les arbres changent de positions à chaque essai.

1.2.3 Conclusion sur la perception et l'action

Il semble donc que le débat sur les relations entre la perception et l'action adresse principalement la question de la nécessité ou non des représentations internes pour percevoir et agir. Williams *et al.* (1999) tentent de synthétiser les positions indirectes et directes. Ainsi, la théorie indirecte (ou computationnelle) n'octroie pas de sens aux informations contenues dans l'environnement (« *Meaningless* »). C'est l'interprétation du système nerveux central (« *Interpretor* ») qui attribue un sens aux informations de l'environnement (*cf.* figure 1.10.A). A l'inverse, pour les défenseurs de la théorie de la perception directe les informations de l'environnement sont porteuses de sens (« *Meaningful* ») sans

interprétation du système nerveux central (*cf.* figure 1.10.B).

En résumé, selon la théorie de la perception indirecte, les actions découlent d'un processus décisionnel utilisant des symboles et la planification, alors que dans le cadre de la perception directe, les actions s'apparentent plus à des réactions émergentes en fonction des caractéristiques de l'environnement. De nombreuses questions restent donc en suspens. Le concept même de représentation est flou. La notion d'affordance émergeant d'un couplage perceptions-actions peut-être proche du concept de schéma typique. Dans tous les cas, la structuration de l'espace ne peut se comprendre sans une intériorisation des interactions entre l'action du sujet et son résultat sur l'environnement.

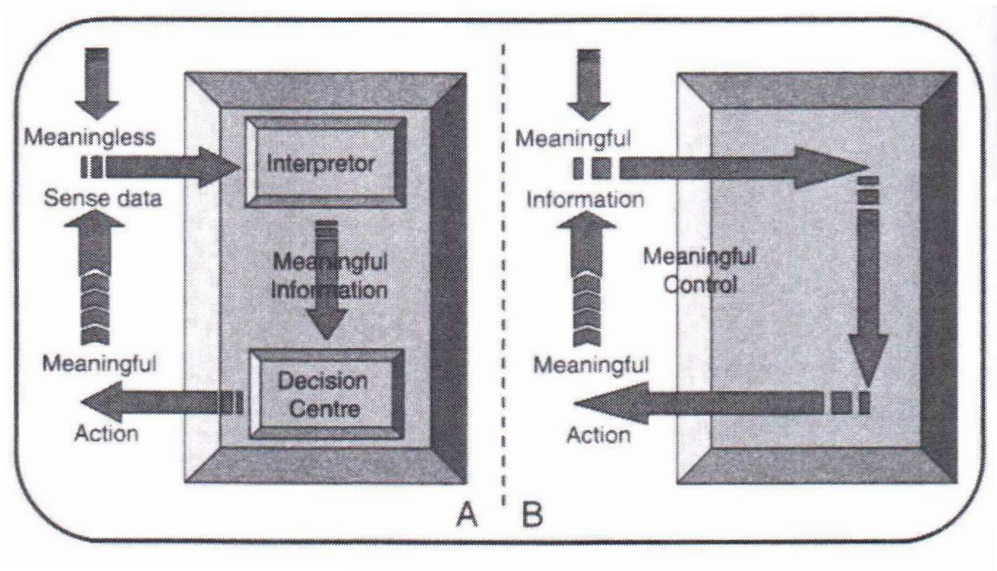


Figure 1.10 – Illustration des conceptions directe et indirecte des relations entre perceptions et actions. Ce schéma est issu des travaux de Meijer (1988) et adapté par Williams *et al.* (1999). Le dessin de gauche (A) synthétise la position indirecte (ou computationnelle) défendant l'idée de la présence de représentations internes. Le dessin de droite (B) décrit la conception de la perception directe pour laquelle l'information est directement contenue dans l'environnement.

1.3 Synthèse sur l'espace

Au cours du développement, les individus acquièrent la capacité à construire un espace représentatif en utilisant la géométrie euclidienne comme un moyen privilégié pour raisonner sur l'espace. Cependant, nos représentations spatiales sont également dépendantes de nos possibilités d'action et des relations entre l'espace et le corps. Il faut donc distinguer l'espace corporel, l'espace proche (accessible sans locomotion) et l'espace distant (accessible avec locomotion). Les cartes géographiques semblent favoriser les représentations globales des espaces distants les plus vastes au sein desquels nous ne pouvons pas agir. Concernant l'espace, la question des relations entre l'action et la percep-

tion se pose donc. A ce propos, alors que certains attribuent un rôle primordial au système nerveux central dans la perception et la planification des actions, d'autres défendent l'idée de comportements émergeants des interactions entre l'environnement et les individus de manière directe.

Finalement, il semble que l'Homme interagisse avec l'espace en articulant ses perceptions et ses possibilités d'action. La compréhension de ces mécanismes soulève un certain nombre de questions.

Quelles sont les étapes de la construction des repères spatiaux ?

Quels sont les processus mis en œuvre ?

Quels sont les cadres de référence pour explorer l'espace ?

Chapitre 2

Navigation et Référentiels

La maîtrise de l'art de la navigation consiste à ne pas se perdre, à anticiper des routes pour se rendre à un point choisi à l'avance. Cette activité nécessite donc des points de repères et des références. Comment ces points de repères se construisent-ils ? Avant de focaliser sur cette question en situation de cécité, nous nous intéressons à nos connaissances sur le développement et les processus mis en œuvre par les individus voyants pour naviguer dans l'espace.

2.1 La construction de l'espace de navigation

Un manière d'étudier cette question est d'analyser l'évolution de la construction de l'espace chez l'enfant.

Comment l'enfant passe-t-il d'un espace sensorimoteur à la représentation d'un espace formel ?

Quels sont les mécanismes qui permettent cette évolution ?

Retrouve-t-on les mêmes processus et les mêmes étapes chez un adulte qui découvre un environnement nouveau ?

Comment ces connaissances s'organisent-elles ?

Que connaît-on sur les cartes mentales ?

2.1.1 Le développement spatial chez les enfants

2.1.1.1 La décentration progressive

D'après Piaget et Inhelder (1948), les premiers rapports entre l'individu et l'espace proviennent naturellement de l'expérience directe, autrement dit des conséquences des actions réalisées dans l'environnement. Au cours de la période sensorimotrice (jusqu'à environ dix-huit mois), l'espace vécu se construit à partir des coordinations entre les premiers déplacements et les perceptions de l'environ-

nement. Immergé dans son environnement, l'enfant construit des espaces proches et de navigation. Cet espace est immédiat, il ne nécessite pas d'être représenté. Par la suite, il intègre des successions de séquences sensorimotrices. A dix-huit mois, l'enfant devient capable de réaliser ces successions de séquences sensorimotrices en sens inverse. Les opérations spatiales sur celles-ci permettent la construction de la notion de réciprocité de proche en proche. Ce processus s'inscrit donc dans la décentration progressive qui caractérise le développement cognitif. Ainsi, les sujets prennent petit à petit du recul sur les actions et les perceptions liées à leurs expériences pour ensuite les généraliser. Piaget (1961) attribue cette décentration progressive aux conflits entre les actions et les perceptions.

Entre deux et sept ans environ, l'enfant reconstruit en représentation l'espace vécu. Il passe donc d'un espace perceptif à un espace représentatif. L'espace représenté se développe en trois étapes. Une étape d'organisation topologique pendant laquelle l'enfant est capable d'établir des relations entre lui et des points de repère, par exemple « la table est devant moi », et des relations entre points de repères, par exemple « la chaise est devant la table ». Une étape d'organisation projective va permettre la création de l'unité de l'espace en tenant compte du point de vue de l'observateur, par exemple « la cour est avant la sortie de l'école ou après l'entrée ». Cette organisation va être structurée, approximativement de sept à douze ans, à partir de points de référence invariants, il s'agit de l'espace euclidien. Il permet les mesures, les calculs, etc ... A partir de douze ans environ, l'enfant construit un espace conceptuel qui peut faire appel à plusieurs systèmes de références.

On passe donc d'une construction spatiale dépendante du point de vue du sujet, à une conception spatiale globale qui demande au sujet de se décentrer afin d'adopter un point de vue aérien puis même de concevoir l'espace sans pouvoir l'imaginer (O'Keefe et Nadel, 1978; Thinus-Blanc et Gaunet, 1997). D'après Piaget (1973b) et Vygotsky (1930), cette évolution nécessite la concomitance des processus ascendant et descendant.

2.1.1.2 Le processus ascendant

La construction de l'espace projectif ne repose que sur des opérations spatiales où le sujet est centré sur lui-même. L'intériorisation de celles-ci est issue des schémas typiques construits au fur et à mesure de l'expérience vécue. Un schéma typique est une structure mentale issue d'une activité de comparaison de situations qui se ressemblent, dont le sujet dégage des points communs. Ce mécanisme de construction de la représentation centrée sur le sujet suit un modèle ascendant (Richard, 1990) où le sujet part des sensations issues de son expérience pour construire une situation qu'il peut se représenter en faisant abstraction des variations des paramètres. C'est ce que Piaget (1973a) nomme l'abstraction simple. Ainsi, au fur et à mesure de ses expériences de déplacement l'enfant identifie la composante commune de ses virages à droite par exemple. De cette manière, la consigne de prendre la première à droite peut aussi bien être associée à une déviation de 40 degrés qu'à une déviation de 120 degrés.

Cependant cette représentation spatiale ne tient pas compte des éléments extérieurs à la situation vécue par le sujet.

2.1.1.3 Le processus descendant

Selon la théorie socioculturelle de Vygotsky (1930), la construction de configuration spatiale globale, comme l'espace euclidien, est réalisée à partir de la transmission du savoir culturel de génération en génération. Les cartes, les tables, les règles, en tant qu'instruments psychologiques, permettent d'accéder à ces savoirs. Si ces savoirs sont préconçus pour les sujets en cours d'apprentissage, ils sont en réalité issus des expériences vécues par les experts qui les ont identifiés et formulés. Ainsi, la conception cardinale numérique de zéro à trois cent soixante degrés est acceptée comme une vérité mathématique et est intériorisée comme telle. De cette manière, on entend qu'un sujet, ayant appris le « concept cardinal » d'une part, et « consulter une carte » d'autre part, ne peut naviguer dans l'environnement physique que s'il dispose d'une boussole. En effet, en l'absence d'information cardinale, le sujet ne peut pas connaître l'orientation de son propre point de vue ni utiliser la représentation « vue d'avion » fournie par la carte. Ainsi, les instruments psychologiques telles que la carte et la boussole permettent au sujet de se décentrer de son propre point de vue et de faire le lien entre une représentation globale et les sensations perçues depuis sa position.

2.1.2 Les étapes de la navigation chez les adultes

Siegel et White (1975) partent du principe que la représentation spatiale se construit au fur et à mesure des expériences perceptives. En ce sens, une fonction majeure de la représentation spatiale est d'organiser les possibilités de déplacements offertes par l'environnement (Lynch, 1960). Autrement dit, il s'agit de stocker en mémoire à long terme les moyens de faciliter nos déplacements.

Pour Siegel et White (1975), les *points remarquables* et les *routes* sont les éléments nécessaires et suffisants à la construction d'une représentation permettant aux êtres vivants de maîtriser leurs déplacements. Cependant la construction d'une représentation spatiale de type configuration est encore plus efficace.

2.1.2.1 Les points remarquables ou repères

Figure 2.1 – Exemple de points remarquables. La tour Eiffel (au fond à droite) est le prototype du point remarquable visuel. Cependant des points remarquables olfactifs comme une boulangerie (à gauche) ou auditifs comme une fontaine (à droite) peuvent servir d'élément remarquable par la spécificité des perceptions qu'ils procurent.

Un point remarquable est un élément perceptible unique précisément localisé dans l'environnement (Siegel et White, 1975). Il s'agit d'une entité spatiale privilégiée qui sert de point de référence et permet de mieux distinguer les autres éléments (Couclelis *et al.*, 1987). Même si les points remarquables sont souvent visuels, ces derniers peuvent également être olfactifs ou auditifs (Golledge, 1999). Ainsi, la tour Eiffel, élément unique et aisément perceptible, se révèle être un point remarquable particulièrement saillant visuellement. Cependant, l'odeur spécifique d'une boulangerie ou le bruit caractéristique d'une fontaine publique peuvent également caractériser un point et de fait le rendre remarquable (*cf.* figure 2.1).

2.1.2.2 Les routes ou représentations de type route

Conformément à la conception de Piaget et Inhelder (1948), Siegel et White (1975) définissent une représentation de type route comme une séquence sensorimotrice issue d'un processus ascendant. Cependant, ces auteurs accordent une importance toute particulière aux points remarquables dans leur conception de ce type de représentation. Ainsi, un individu, qui part pour un itinéraire en connaissant les points remarquables qu'il va rencontrer, dispose d'une représentation de type route. Autrement dit, celle-ci relie les différents points remarquables entre eux et permet ainsi au voyageur de maîtriser sa position s'il ne quitte pas l'itinéraire connu (*cf.* figure 2.2). Cependant, si un point remarquable est absent ou ne correspond pas à l'attente du sujet, ce dernier est rapidement « perdu ». Les représentations de type route restent donc des « représentations du terrain » de premier ordre (Siegel et White, 1975). La notion de représentation de type route est reprise par de nombreux auteurs (O'Keefe et Nadel, 1978; Thorndyke et Hayes-Roth, 1982; Golledge, 1987).

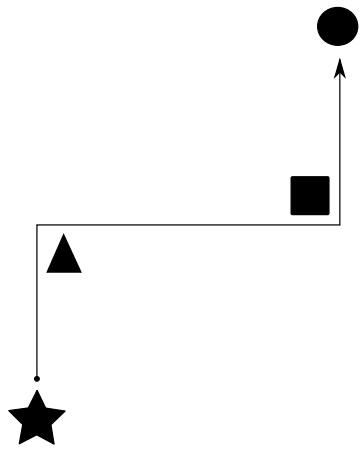


Figure 2.2 – Représentation spatiale de type route basée sur des points de repère. Ici pour aller de l'étoile au cercle, il faut tourner à droite au triangle puis à gauche au carré. Pour un individu suivant strictement cette route, l'absence du carré entraîne une impossibilité d'atteindre le cercle. L'espace extérieur à la route correspond à un espace non défini dans une représentation spatiale de type route.

2.1.2.3 Les configurations ou représentations de type carte

En plus des points remarquables et des représentations de types route, Siegel et White (1975) définissent des représentations de second ordre, qu'ils appellent les configurations ou représentations de type carte. Ces représentations proviennent d'un ensemble de représentation de type routes qui relient des points remarquables entre eux. Une représentation de type carte est supérieure à une représentation de type route dans le sens où elle permet l'intériorisation d'une « image » globale et non séquentielle. Ainsi, en l'absence d'un point remarquable, le sujet, disposant d'une configuration spatiale, peut se référer aux autres points remarquables et inférer de nouveaux itinéraires pour atteindre sa destination (*cf.* figure 6.7).

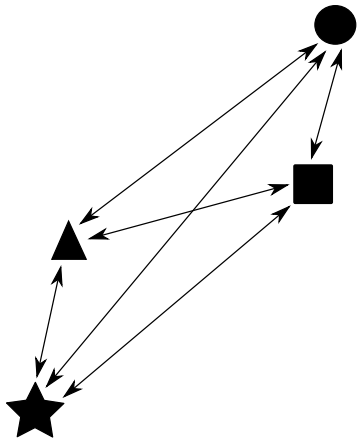


Figure 2.3 – Représentation spatiale de type carte basée sur des points de repère. Ici, chaque point de repères est défini par rapport aux autres.

2.1.2.4 Les étapes et leurs mécanismes

Selon Siegel et White (1975), la construction de la représentation spatiale chez les adultes est le résultat de connections inter-sensorielles, majoritairement visuelles, motrices et kinesthésiques. Siegel et White (1975) décrivent trois étapes pour l'élaboration de configurations spatiales, ou représentations de type carte, chez les adultes.

Tout d'abord, « la mémoire de reconnaissance du contexte » insiste sur l'importance du contexte dans l'encodage de l'environnement. Siegel et White (1975) expliquent qu'il ne suffit pas de percevoir un point remarquable pour l'inclure dans des représentations de types route ou carte. La contextualisation d'un point remarquable en particulier nécessite que l'attention soit portée sur ce qu'il y a autour, un évènement s'y rapportant ou encore sur des connections directes avec d'autres points remarquables. Ainsi, le « Phare du Portzic » seul, c'est-à-dire décontextualisé, ne constitue pas un point remarquable efficace. A l'inverse, si le sujet peut connecter à ce phare un autre point remarquable telle que la « Pointe des Espagnols », alors ce sujet saura situer le passage du goulet de la rade de Brest par exemple.

Ensuite, l'élaboration d'une représentation de type route ne consiste pas seulement à mémoriser une succession de segments entre des points remarquables, il s'agit également d'intérioriser des *stimuli* permettant d'identifier les emplacements des changements de direction et ainsi se maintenir sur l'itinéraire de la *route*. Par exemple, si au sein de l'itinéraire « parfait », chaque point remarquable correspond à un changement de direction, certains repères peuvent se cantonner au rôle d'informer le voyageur sur la distance parcourue. Ainsi, même si la route est toute droite, grâce au bruit de la fontaine, le piéton aveugle, ayant repéré ce point et l'ayant connecté à d'autres, sera informé plus précisément de sa position.

Enfin, l'élaboration de représentation de type carte résulte de l'intégration de multiples représentations de type route fondées sur la relation entre des points de repères dans un réseau de relations inter-connectées. Ces configurations dépendent des expériences répétées, de l'intégration temporelle ainsi que du sens associé. Siegel et White (1975) illustrent ce stade de construction de l'espace de navigation par la connaissance des conducteurs de taxi américains. Ainsi, lorsque ces derniers optent pour un itinéraire, ils tiennent compte à la fois des différents chemins potentiels (points remarquables inter-connectés), de l'état de l'itinéraire (expériences répétées) et encore des possibles embouteillages en fonction de l'heure (intégration temporelle). Cette intégration est accélérée par l'utilisation de représentation de type carte (processus descendant).

La construction de l'espace chez les sujets adultes consiste donc à créer un réseau de points remarquables contextualisés. Différentes études s'appuient sur cette théorie pour expliquer la construction de la représentation spatiale en cours de déplacement réel (Thorndyke et Hayes-Roth, 1982; Golldege *et al.*, 1985; Mac Namara, 1986) ou virtuel (Ruddle *et al.*, 1997; Witmer *et al.*, 2002). Cette représentation, constituée de réseaux de points, s'apparente à une sorte de « carte mentale ». Cependant la métaphore de la carte alimente les polémiques sur la nature des représentations de l'espace depuis l'apparition de la notion de carte cognitive spatiale.

2.1.3 Les cartes cognitives spatiales

Depuis les travaux de Trowbridge (1913) et Tolman (1948), la notion de carte cognitive spatiale est largement employée au sens de « champ cartographié mental ». Pour Tolman (1948), les cartes cognitives permettent aux animaux et aux individus de réaliser de nouveaux raccourcis entre deux points connus.

Downs et Stea (1973) élargissent cette définition en envisageant la carte cognitive spatiale comme « un processus d'encodage, de stockage et de restitution de l'information spatiale faisant l'objet de transformations perpétuelles pour la gestion du quotidien (p.7) ».

Cependant la revue de littérature dressée par Kitchin (1994), soulève certaines controverses sur la nature des cartes cognitives spatiale. L'auteur décrit quatre positions majeures :

→ « L'état explicite ». Les cartes cognitives spatiales seraient des modèles euclidiens dont les propriétés géométriques se révéleraient identiques à celles du monde réel (O'Keefe et Nadel, 1978).

→ « L'analogie ». Les cartes cognitives spatiales seraient analogues à des cartes géographiques seulement si l'information a été présentée sous une forme euclidienne comme des cartes ou des données métriques par exemple (Downs et Stea, 1973; Kaplan, 1973).

→ « La métaphore ». Les cartes cognitives spatiales ne s'apparenteraient pas à des cartes mais elles seraient seulement utilisées comme telles (Kuipers, 1983).

→ « La construction hypothétique ». Le terme de carte cognitive spatiales et ses synonymes approxi-

matifs désigneraient « des processus et des organisations inobservables des éléments de la connaissance sur l'espace (p.8) » (Moore et Golledge, 1976).

La conception de la carte cognitive spatiale s'éloigne donc de la carte géographique au sens strict du terme.

Selon Gallistel (1990), toute représentation spatiale peut être appelée carte cognitive en tant qu'encodage des relations des éléments de l'environnement. En effet, pour cet auteur la navigation nécessite d'estimer sa position dans un environnement. Par conséquent, que les repères soient issues de points remarquables, de sensations proprioceptives ou même d'estimation de temps, Gallistel (1990) compare la représentation spatiale à une sorte de carte.

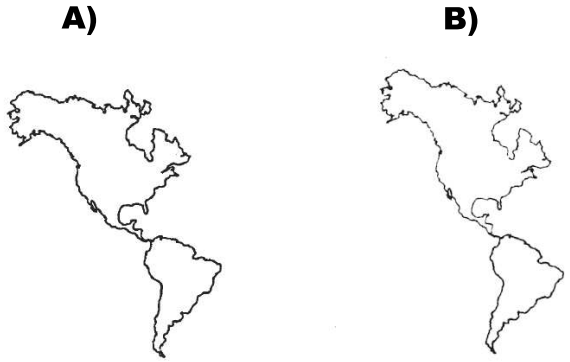


Figure 2.4 – Matériel graphique utilisé par Tversky (1981). La carte A) est exacte alors que la carte B) est un planisphère mondial modifié. L'axe de l'Amérique du Sud est aligné sur l'axe sud-nord. L'auteur demande aux sujets de désigner la bonne représentation du planisphère. En raison de l'*effet d'alignement* la majorité des personnes interrogées choisissent la carte A).

De son côté, Tversky (1981) nuance la précision de la carte cognitive en soulevant l'importance des déformations entre la « réalité physique » et les représentations spatiales mentales. Elle met notamment à jour « l'effet d'alignement » selon lequel les individus ont tendance à se représenter l'espace en alignant les axes intrinsèques des objets et des configurations avec les axes verticaux et horizontaux de l'environnement. (*cf.* figure 2.4) Au regard des caractéristiques des représentions spatiales construites par les individus, Tversky (1993) introduit la notion de « collage cognitif », ressemblant fortement à l'« Atlas cognitif » de Kuipers (1982). Ici, l'espace mental ne serait pas constitué d'une carte unifiée mais de multiples « morceaux » de cartes comportant chacun leur échelle et leur déformation. Ainsi, certains morceaux se connecteraient ou se superposeraient ou au contraire laisseraient des « trous » entre eux.

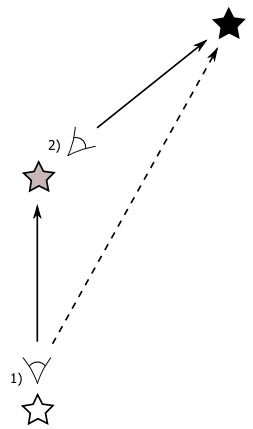


Figure 2.5 – Illustration d'une inférence spatiale, c'est-à-dire de la déduction d'un nouveau raccourci. Selon Thinus-Blanc (1987, 1988), la réalisation du trajet allant de l'étoile blanche à l'étoile grise et allant de l'étoile grise vers l'étoile noire permet l'élaboration d'un raccourci depuis l'étoile blanche vers l'étoile noire.

Par ailleurs, pour Thinus-Blanc (1987, 1988) une carte cognitive est une représentation spatiale indépendante du point de vue du sujet. L'addition de deux trajets (ou vecteurs) depuis deux points de vue d'un individu permettrait la réalisation d'une inférence spatiale, soit la création d'un raccourci s'inscrivant dans une carte cognitive au sens où Tolman (1948) la définit (*cf.* figure 2.5). Les auteurs soulignent que si la réalisation d'un itinéraire entraîne un encodage spatial de points remarquables depuis le point de vue du sujet, la représentation de l'inférence spatiale est indépendante de ce point de vue. L'inférence spatiale est un raisonnement déductif participant à la construction d'une carte cognitive spatiale.

Pour Bennett (1996), bien que la notion de carte cognitive soit attrayante en raison de leur apparente analogie avec les cartes géographiques couramment utilisées par les Hommes, la déduction d'un raccourci peut également être effectuée en l'absence de carte cognitive. Tout d'abord, le déplacement entre deux points connus peut être réalisé à l'« estime » (Gallistel, 1990). Ainsi, un raisonnement spatial suivi d'un déplacement fondé sur la perception du temps et le maintien d'une direction de façon proprioceptive ne participerait pas à l'élaboration d'une carte cognitive (Bennett, 1996). Par ailleurs, la reconnaissance d'un point remarquable depuis un nouveau point de vue constituerait un autre moyen de réaliser un raccourci sans utiliser de carte cognitive. Pour Bennett (1996), l'utilisation de raccourcis ne témoigne donc pas nécessairement de la présence d'une carte cognitive spatiale.

Golledge (1999) résume en indiquant que le terme de carte cognitive désigne la représentation interne des informations spatiales avec lesquelles les Hommes encodent leurs relations avec l'environnement afin de déterminer où ils se trouvent. L'élaboration d'une carte cognitive permet l'encodage des relations entre les objets pour aller d'un endroit à un autre ou communiquer leurs connaissances spatiales à autrui. Plus précisément, Golledge (1999) explique que « les cartes cognitives sont constituées de points, de lignes, d'aires et de surfaces. Elles sont apprises, intégrées et mémorisées de manière qua-

litative et quantitative. Quand elles sont encodées ou interprétées quantitativement, les manipulations d'informations utilisant la géométrie euclidienne et la trigonométrie mentale sont favorisées. Quand elles sont encodées qualitativement, elles fournissent des informations d'ordre, d'inclusion, d'exclusion, et autres informations topologiques (p.15) ». Ainsi, sous le nom de carte cognitive, cohabiteraient des représentations spatiales relevant de la topologie (encodage qualitatif) et de la géométrie euclidienne (encodage quantitatif). Par ailleurs, à travers la « théorie du point d'ancrage » Golledge et Spector (1978) s'accordent avec Siegel et White (1975) en expliquant que plus les points remarquables sont connectés à leurs homologues, plus nombreuses sont les routes et plus globale et précise est la carte (*cf.* figure 2.6).

En résumé, malgré les différences existant entre les théories du développement et de la construction de la représentation de l'espace de navigation, il apparaît le consensus général d'un parallèle entre la maturité du développement spatial des individus et la construction d'une représentation globale de l'espace de navigation. Ainsi, comme le soulignent Hart et Moore (1973) à propos de la théorie piagétienne ou Golldege *et al.* (1985) au sujet de la proposition de Siegel et White (1975), il existe une décentration progressive pendant laquelle les individus passent d'une référence de leur propre point de vue à une référence d'un point de vue extérieur.

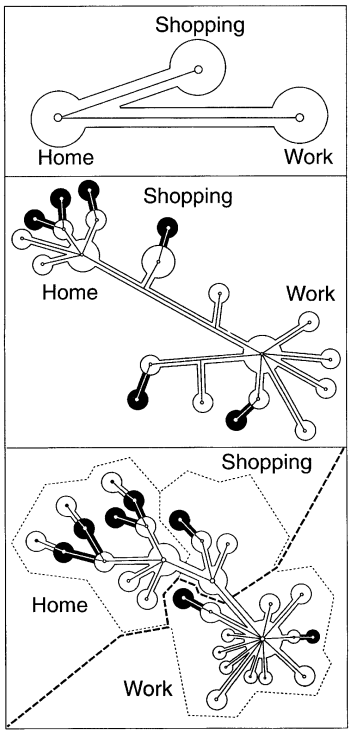


Figure 2.6 – Evolution d'une représentation spatiale selon la « théorie du point d'ancrage » de Golledge et Spector (1978). Du haut vers le bas, les points remarquables constituent progressivement un réseau de points interconnectés formant une configuration globale.

2.1.4 Conclusion sur la construction de l'espace de navigation

Finalement, le processus de décentration progressive permettant à l'enfant de construire un espace de navigation débute par la confrontation entre ses expériences sensorimotrices et ses perceptions, soit un processus ascendant. Ce processus entraîne la formation de représentations plus globales que l'enfant cherche alors à appliquer au monde qui l'entoure, soit un processus descendant. L'élaboration de ces représentations est accélérée par des agents culturels tels que les plans ou les cartes. Les espaces de navigation structurés permettent à l'adulte de construire des configurations mentales de nouveaux lieux en respectant différentes étapes. Ainsi, la détection de points remarquables, leur association dans des routes et la connexion de ces dernières pour former des représentations de type carte permettent à l'Homme de naviguer. Ces configurations mentales sont aussi appelées des cartes cognitives spatiales. Malgré les débats que cette notion occasionne, nous retenons qu'il s'agit d'une représentation permettant de raisonner sur l'espace indépendamment de la position et de l'orientation du sujet, cette représentation s'appuie donc sur des cadres de référence ou référentiels spatiaux.

2.2 Les référentiels spatiaux

Quels sont les principaux types de référentiels spatiaux permettant de se représenter l'espace ?

Quels sont les paramètres qui influencent la nature de l'encodage des représentations spatiales ?

Comment ces représentations se coordonnent-elles pour permettre la navigation ?

2.2.1 Définition des référentiels spatiaux

Pour Levitt et Lawton (1990), la navigation nécessite de répondre aux trois questions suivantes : « Où suis-je ? », « Où sont les autres endroits par rapport à moi ? » et « Comment puis-je rejoindre ces endroits depuis ici ? ». Trullier *et al.* (1997) reprennent cette triptyque en insistant sur la nécessité d'un cadre de référence spatiale qui soit extérieur au sujet pour répondre à la première question, alors que la seconde se réfère à l'orientation du sujet. Ils modifient la seconde question en expliquant qu'elle devrait plutôt être la suivante : « Où sont les éléments pertinents par rapport à moi ? ». Ces auteurs insistent donc sur le caractère fonctionnel de la représentation de l'espace. Finalement, la troisième question renvoie à la coordination des cadres de référence dans lesquels s'inscrivent des informations relatives au sujet d'une part, et à l'environnement d'autre part.

Shelton et McNamara (2001) définissent un cadre de référence spatiale comme « un système de relations consistant à localiser les objets, les points de référence et les relations spatiales qui peuvent exister entre ceux-ci ». Il existe deux principaux types de référentiels spatiaux : les référentiels de type

égocentré et de type *allocentré* (Paillard, 1971; Sedgwick, 1983; Klatzky, 1998; Holdstock *et al.*, 2000; Mou et McNamara, 2002; Feigenbaum et Morris, 2004).

2.2.1.1 Le referentiel de type égocentré

Un référentiel de type égocentré est dépendant du point de vue de l'individu. Une représentation s'inscrivant dans ce type de référentiel encode les relations « individu-objets ». La position et l'orientation du sujet sont respectivement les origine et axe de référence de toute mesure d'angles ou de distances. Dans ce type de référentiel, seules les relations spatiales entre les individus et les objets sont encodées en mémoire. On parle alors d'*azimut* pour désigner l'angle formé par l'orientation du sujet et la direction d'un élément de l'environnement. Il peut s'exprimer avec des adverbes spécifiques (droite, gauche, devant, derrière,...) ou en degrés (90 degrés à bâbord ou à gauche par exemple). Cependant la métaphore de l'horloge et l'expression des directions en horaires en considérant midi en face du sujet reste le plus intuitif (*cf.* figure 2.7).

Pour illustrer, les marins règlent leurs voiles en fonction de leur « allure », soit l'angle « voilier-vent ». L'orientation du voilier est donc l'axe de référence. Ainsi, un voilier naviguant au près reçoit le vent à 45 degrés par rapport au nez du bateau. Dans le cas d'une pratique instrumentée comme la voile, l'outil, ici le voilier, s'inscrit dans une prolongation imaginaire du corps. L'axe du voilier est donc considéré comme un axe de référence de type égocentré.

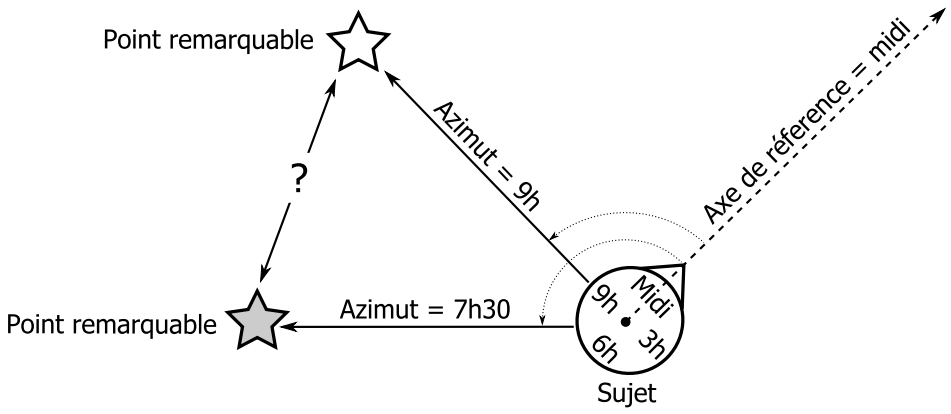


Figure 2.7 – Relations entre le sujet et des points remarquables de l'environnement au sein d'un référentiel de type égocentré. L'axe de référence, représenté par la ligne en pointillés, se confond avec l'orientation du sujet. Les « azimuts » des points remarquables sont définis par rapport à cet axe de référence. Ainsi, l'étoile blanche se trouve à neuf heures (ou à gauche, ou à 90 degrés bâbord) alors que l'étoile grise se trouve à sept heures et demi (ou à l'arrière gauche ou à 135 degrés bâbord). Dans un référentiel de type égocentré, la relation entre l'étoile blanche et l'étoile grise n'est pas définie.

2.2.1.2 Le référentiel de type allocentré

Un référentiel de type allocentré est indépendant du point de vue de l'individu. Une représentation s'inscrivant dans ce type de référentiel encode les relations « objets-objets ». Son origine et son axe de référence sont choisis arbitrairement. Les mesures d'angles et de distances peuvent exister indifféremment entre des objets ou entre l'individu et des objets. Dans ce type de référentiel, l'individu est considéré comme un élément au même titre qu'un objet.

On parle alors de *relèvement* pour désigner l'angle existant entre l'axe de référence et la direction d'un point remarquable. L'axe de référence est généralement le nord. Cela permet l'utilisation des directions géographiques tels que les points cardinaux (nord, sud, est, ouest,...) où les degrés cardinaux numériques (de 0° à 360°) (*cf.* figure 2.8). Les marins s'orientent grâce aux caps indiqués par le « compas » (boussole solidaire du voilier) et se repèrent à l'aide du « compas de relèvement » (boussole permettant de viser les points remarquables pour mesurer leurs orientations géographiques). Ainsi, les déplacements maritimes sont définis et contrôler dans un référentiel de type allocentré.

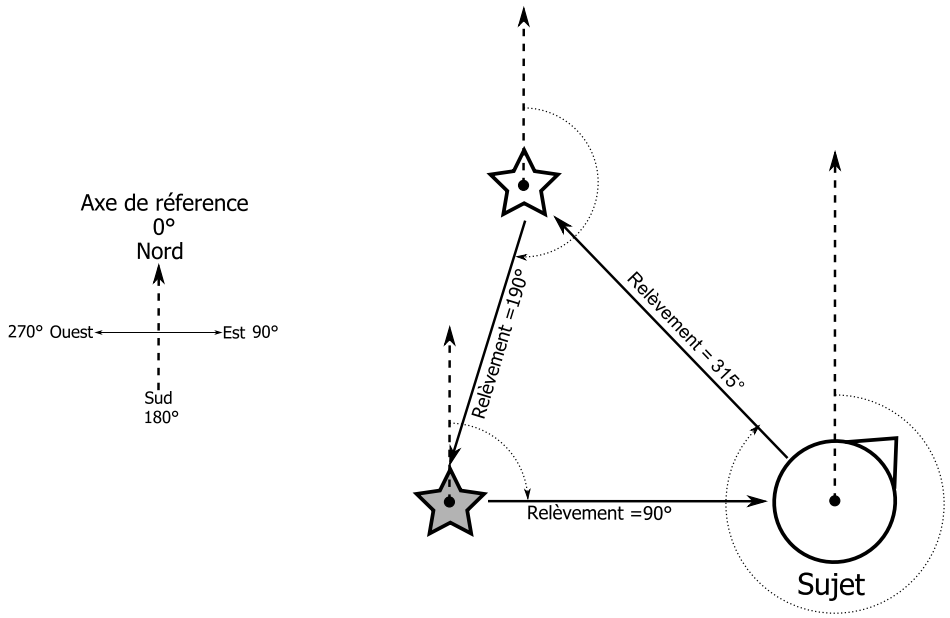


Figure 2.8 – Illustration des relations entre le sujet et les points remarquables de l'environnement dans un référentiel de type allocentré. L'axe de référence, représenté par la ligne en pointillés, est généralement l'axe nord-sud indépendamment de l'orientation du sujet. Les « relèvements » entre les points remarquables et le sujet sont définis par rapport à cet axe de référence. Ainsi, l'étoile blanche se trouve à 315 degrés (ou au nord-ouest) du sujet ; l'étoile grise se trouve à 190 degrés (ou au sud-sud-ouest) de l'étoile blanche ; et le sujet se trouve à 90 degrés (ou à l'est) de l'étoile grise. Contrairement au référentiel de type égocentré, le référentiel de type allocentré permet la définition de la relation spatiale entre l'étoile blanche et l'étoile grise indépendamment de la position du sujet.

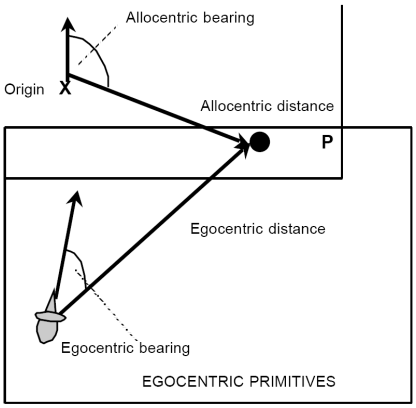


Figure 2.9 – Illustration schématique des référentiels de types égo et allocentrés d'après Klatzky (1998). Sur ce schéma la primitive égocentrée se compose d'une distance (*Egocentric distance*) et d'un angle (*Egocentric bearing*) par rapport à la position du navigateur, il en résulte des coordonnées relatives à la position et à l'orientation de celui-ci. La primitive allocentrée se compose d'une distance (*Allocentric distance*) et d'un angle (*Egocentric bearing*) par rapport à une origine et une direction de référence, en général le nord. Ainsi, le même point P ne possède pas les mêmes coordonnées au sein des référentiels de types égo et allocentrés.

La position d'un même point de l'espace est caractérisé de façon différente selon que l'on utilise un référentiel de type égocentré ou de type allocentré (*cf.* figure 2.9). En effet, selon le premier, les positions des points remarquables changent aussitôt que le sujet se déplace. A l'inverse, selon le second, les points remarquables ne changent jamais de position et constituent de véritables points de repères.

2.2.1.3 Les particularités terminologiques

Dans la littérature de nombreux termes différents désignent ces deux référentiels.

Le référentiel de type égocentré est également nommé référentiel « personne-centré » (Sedgwick, 1983), référentiel « égocentrique » (Klatzky, 1998), référentiel « intrinsèque » (Levinson, 1996), référentiel fournissant des « informations idiothétiques » (Mittelstaedt et Glasauer, 1991) ou encore référentiel « centré-sujet » (Taylor et Tversky, 1996; Amorim et Stucchi, 1997).

Le référentiel de type allocentré est également appelé référentiel « environnement-centré » (Sedgwick, 1983), référentiel « environnemental » (Klatzky, 1998; Pani et Dupree, 1994), référentiel « centré-environnement » (Taylor et Tversky, 1996), référentiel fournissant des informations « allothétiques » (Mittelstaedt et Glasauer, 1991) ou encore référentiel « absolu » (Levinson, 1996).

Dans un souci de clarté et d'homogénéité, nous choisissons d'utiliser les termes « égocentré » et « allocentré » quels que soient les auteurs dont nous présentons les idées.

Les distinctions et les correspondances entre les différentes appellations concernant les référentiels spatiaux ne sont pas toujours triviales. En effet, outre les deux principaux référentiels, d'autres cadres

de référence, moins utilisés, sont présents dans la littérature. Ainsi, le référentiel « relatif » de Levinson (1996), qu'Amorim et Stucchi (1997) appellent « centré-objet », utilise un objet de référence comme un repère orienté à partir duquel les autres objets sont positionnés. Par exemple, un piéton peut se trouver « devant » une voiture. Par ailleurs, Coluccia *et al.* (2007), reprenant les travaux de Grush (2000), introduisent le référentiel « égocentrique - décentré ». L'orientation de ce référentiel est confondue avec celle du corps, donc de type égocentré, mais son origine se trouve translatée en un point différent de la position du corps. Par exemple, lorsque le navigateur annonce qu'en conservant le cap la bouée sera « laissée à tribord », la compréhension de cette situation nécessite de réaliser un déplacement mental de la position du voilier sans changer son orientation. Finalement, Mou *et al.* (2008) décrivent le référentiel « intrinsèque à la configuration ». Ici, la direction de référence correspond à un alignement entre des éléments de la configuration de l'environnement. Par exemple, l'axe intrinsèque à la forme d'un avion est longitudinale alors qu'un ballon n'en comporte pas.

2.2.1.4 Le rôle des référentiels spatiaux

Le rôle des référentiels spatiaux dans la construction des représentations de l'environnement a fait l'objet d'un certain nombre d'expérimentations. Tout d'abord, Logan (1995) a demandé à ses sujets de donner la couleur d'un stimulus visuel défini soit dans un référentiel de type égocentré (« devant, derrière, à droite ou à gauche »), soit dans un référentiel de type allocentré (0°, 90°, 180° ou 270°). Les réponses sont vingt pour cent moins rapides dans le second type de référentiel. Ces résultats montrent que l'utilisation d'un point de vue non-égocentré demande un effort cognitif plus important. Ensuite, Roskos-Ewoldsen *et al.* (1998) ont proposé une tâche où il s'agissait d'apprendre sept objets dans une pièce, selon trois orientations différentes (0°, 90° et 225°). Ils ont alors questionné les sujets sur les positions relatives des objets, soit selon un des trois points de vue connus (égo), soit selon un autre point de vue (allo). Les réponses se révèlent moins précises dans un référentiel de type allocentré. Le référentiel de type égocentré semble donc plus spontané que le référentiel de type allocentré qui nécessiterait des opérations cognitives supplémentaires. De nombreux auteurs (Presson et Montello, 1994; Sholl et Nolin, 1997; Diwadkar et McNamara, 1997; Shelton et McNamara, 1997; Klatzky, 1998) s'accordent à dire que nous construisons plus facilement une représentation spatiale respectant le point de vue dans lequel nous l'avons apprise (égo).

2.2.2 La nature de l'encodage et l'influence des paramètres

Différentes approches expérimentales s'interrogent sur les facteurs influençant la nature de l'encodage spatial.

2.2.2.1 Les rotations et translations du sujet

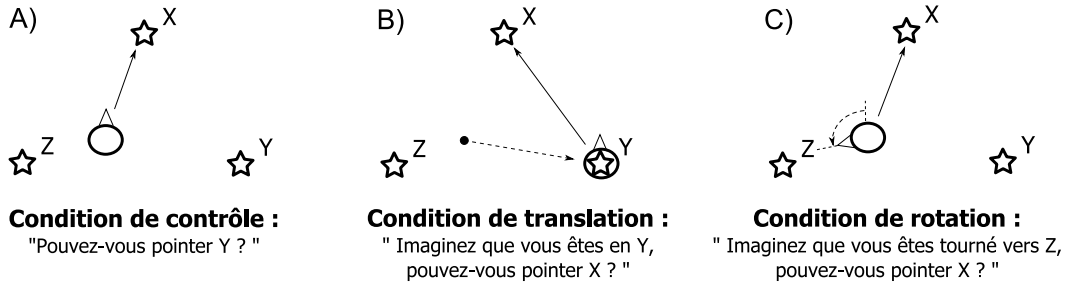


Figure 2.10 – Illustration des positions et orientations des sujets relativement aux objets lors de l'expérimentation de Rieser (1989); Easton et Sholl (1995) et autres. Le cercle est la position du sujet, le triangle au contact est son orientation. Les étoiles représentent les objets. Ici, X est l'objet cible, Y et la position imaginée en condition de translation et Z est l'orientation imaginée en condition de rotation. Les flèches en pointillés correspondent aux transformations imaginées alors que les flèches pleines représentent les réponses attendues.

Au cours d'une première expérience, Rieser (1989) demande à des sujets d'apprendre les emplacements de neuf objets disposés en cercle autour d'eux à l'intérieur d'une pièce. Après cet apprentissage, il les invite les sujets à se bander les yeux et leur demande de pointer les emplacements des différents objets-cibles selon trois conditions :
→ depuis leur propre position (condition de contrôle) : « Pouvez-vous pointer Y ? » (*cf.* figure 2.10.A) ;
→ en imaginant qu'ils occupent la place d'un objet (condition de translation) : « Imaginez que vous êtes en Y, pouvez-vous pointer X ? » (*cf.* figure 2.10.B) ;
→ en se figurant qu'ils sont tournés vers un objet (condition de rotation) : « Imaginez que vous êtes tourné vers Z, pouvez-vous pointer X ? » (*cf.* figure 2.10.C).

En condition de translation, les précisions des réponses et les temps de réaction sont comparables à ceux obtenus en condition de contrôle. Pour Rieser (1989), l'absence d'influence de la translation mentale sur les performances des sujets signifie que ces derniers n'ont pas besoin de déduire leur point de vue imaginé à partir du point de vue initial d'encodage. Argumentant que les processus d'inférence spatiale coûtent du temps, l'auteur interprète que les sujets ne font pas appel à une représentation des relations individu-objets mais ont plutôt un accès direct à une représentation de type objets-objets. L'auteur conclut finalement que les sujets encodent une représentation de la configuration directement dans un référentiel de type allocentré .

En condition de rotation, les estimations de direction sont significativement moins précises qu'en condition de contrôle ou de translation. De plus, les temps de réponses augmentent en fonction de l'amplitude de la rotation. Rieser (1989) interprète ces résultats comme la preuve de la sollicitation de processus différents de ceux de la translation. Cependant, pour l'auteur, si pointer l'objet-cible

nécessitait de faire la différence des angles « orientation initiale - orientation imaginée » et « orientation initiale - direction de l'objet cible », « les temps de latence seraient tous les mêmes puisqu'il s'agirait d'un calcul algébrique indépendant des valeurs elle-mêmes (p.1165) ». Autrement dit, pour Rieser (1989), toute opération impliquant deux substrats et un opérateur nécessite le même effort cognitif et donc le même temps de calcul. Cette hypothèse n'étant pas vérifiée, l'auteur avance que les sujets se représentent directement être en face de l'objet demandé avant de déduire la direction de l'objet-cible. Finalement, Rieser (1989) suggère un encodage fournissant un accès direct à un référentiel de type allocentré pour résoudre les tâches de rotation mentale.

2.2.2.2 Les mouvements du sujet

Rieser (1989) avance également que le mouvement permet d'accéder plus directement à la connaissance spatiale de nouveaux points de vue. Celle-ci semble donc être actualisée au fur et à mesure de la locomotion. Critiquant cette idée, Farrell et Robertson (1998) mettent en place une expérience similaire, à la différence qu'ils n'informent pas les sujets de l'objet auquel ils font face. Ces derniers doivent donc déduire leur orientation à partir de la rotation physique guidée par l'expérimentateur. Il est ensuite demandé aux sujets de pointer les objets-cibles selon deux conditions. En « condition d'actualisation », les sujets tiennent compte de leur rotation physique. En « condition d'ignorance », les sujets s'imaginent ne pas avoir tourné. Les résultats montrent que les temps de réponse ne sont pas affectés par l'amplitude de la rotation en condition d'actualisation, alors que les temps de réponse augmentent avec l'angle de la rotation en condition d'ignorance. Ainsi, cette actualisation systématique dans un référentiel de type égocentré semble donc s'opérer au fur et à mesure des déplacements. D'après les auteurs, pour estimer une direction imaginée après une rotation physique, les sujets doivent effectuer la rotation mentale inverse pour se référer à leur point de vue d'encodage. Ainsi, l'actualisation pourrait être rompue par un processus mental volontaire lorsque la tâche le nécessite. Farrell et Robertson (1998) suggèrent donc que l'actualisation d'un point de vue différent du point de vue actuel est déclenchée volontairement alors que l'actualisation du point de vue courant est automatique.

Presson et Hazelrigg (1984), Presson et Montello (1994) et Waller *et al.* (2002) montrent que la locomotion favorise l'encodage d'une représentation spatiale de façon automatique dans un référentiel de type égocentré (Presson et Hazelrigg, 1984; Presson et Montello, 1994; Waller *et al.*, 2002). Cependant ces auteurs ne sont pas toujours d'accord sur les conditions nécessaires à cette actualisation. Pour Presson et Hazelrigg (1984), le point de vue d'encodage est actualisé lorsque les sujets sont confrontés à un espace de grande échelle « navigable », alors qu'il ne l'est pas lorsqu'il s'agit de l'exploration d'un petit espace de manipulation « non-navigable ». Pour Waller *et al.* (2002) si les sujets connaissent leur position et leur orientation, ils favorisent le point de vue courant ; par contre, si les sujets sont désorientés, ils se réfèrent à leur point de vue initial.

2.2.2.3 Le point de vue initial d'apprentissage

Dans une première expérience, Sholl (1987) demande à des sujets étudiants d'estimer des directions entre des points remarquables de leur université d'une part, et entre des villes du nord-est de l'Amérique d'autre part. Les sujets répondent face à l'ouest d'où ils peuvent voir l'université par la fenêtre sans que les points remarquables ne soient apparents, ou face au nord, respectant ainsi la convention et les habitudes géographiques. Pour répondre, les sujets pointent du doigt dans la direction de l'élément que l'expérimentateur leur demande d'estimer. Les résultats montrent que les estimations de direction des points remarquables de l'université sont plus rapides et plus précises lorsque les sujets sont orientés vers l'ouest que lorsqu'ils sont orientés vers le nord. A l'inverse, les performances relatives aux villes sont meilleures lorsque les sujets sont orientés au nord et plus faibles lorsque ces derniers sont tournés vers l'ouest. Autrement dit, l'alignement entre le point de vue depuis lequel l'apprentissage a eu lieu et celui utilisé lors de la restitution améliore les estimations. Sholl (1987) en déduit que les sujets construisent et rappellent leur représentation spatiale depuis leur propre point vue au moment de l'apprentissage, c'est-à-dire dans un référentiel de type égocentré.

Par ailleurs, Mou *et al.* (2004) demandent à des sujets d'explorer une configuration spatiale depuis une position et une orientation d'apprentissage. Les sujets, dont les yeux ont été bandés, sont guidés par l'expérimentateur afin de marcher jusqu'au centre de la configuration et changer d'orientation. Il est alors demandé aux sujets de pointer un objet (condition actualisée) ou d'imaginer qu'ils sont à leur point de vue initial d'apprentissage avant de pointer un objet (condition imaginée). Les temps et les précisions des réponses sont meilleures en condition imaginée qu'en condition actualisée.

S'appuyant également sur les études de Shelton et McNamara (2001) et Mou et McNamara (2002), Mou *et al.* (2004) concluent que leur résultats montrent que la représentation spatiale n'est pas actualisée au fur et à mesure des déplacements mais qu'elle favorise le point de vue initial d'apprentissage. Pour ces auteurs, le référentiel de type allocentré est utilisé lorsque les sujets sont perdus, ou plus précisément lorsqu'ils ne parviennent plus à faire le lien entre le point de vue initial et le point de vue actuel. Dans ce cas, le recours à une représentation durable de la globalité de l'environnement permettrait aux sujets de se localiser par rapport à différents points de repère, reconnaissant ainsi les relations individu-objets actuelles.

2.2.2.4 La désorientation du sujet

En accord avec les résultats des études de Diwadkar et McNamara (1997), Simons et Wang (1998) et Wang et Simons (1999), Wang et Spelke (2000, 2002) décrivent trois processus sur lesquels reposent la construction d'une représentation spatiale. Le premier système consiste en l'intégration de la route en mémoire à court terme par l'encodage au fur et à mesure des déplacements. Le second opère une reconnaissance de lieu en fonction des points remarquables accessibles depuis le point de vue propre

du sujet. Le troisième processus est un système de réorientation au cours duquel la congruence des différents points de vue permet d'abstraire la forme géométrique de l'environnement.

Afin de préciser les conditions de ce fonctionnement, Wang et Spelke (2000) demandent à des sujets ayant appris une configuration de six objets d'estimer des directions alors qu'ils ont été désorientés par des rotations physiques dans l'obscurité. Sans surprise, les réponses sont moins précises que lorsque les sujets n'ont pas été désorientés. Ensuite, les auteurs allument un repère lumineux afin de permettre aux sujets d'actualiser leur position en cours de déplacements. Ici, les erreurs d'estimations se révèlent moins importantes. Au cours d'une troisième séquence, les expérimentateurs ne rallument le repère qu'après la désorientation. Cette fois, les erreurs redeviennent comparables à celles obtenues en absence de foyer lumineux. Les auteurs interprètent ces derniers résultats comme la confirmation d'une actualisation de la représentation au fur et à mesure des déplacements. En effet, si la présence d'un point de repère se révèle nécessaire pour améliorer l'orientation en cours de déplacement, le processus de reconnaissance de point remarquable semble dominer celui de la reconnaissance de la forme géométrique de l'environnement.

Cependant, cela n'entraîne pas nécessairement l'inexistence de représentation de type objets-objets. Afin de vérifier les conditions dans lesquelles une telle représentation pourrait se former, Wang et Spelke (2000) s'inspirent d'une série d'expériences où Cheng (1986), Hermer et Spelke (1994) et Hermer et Spelke (1996) mettent respectivement en évidence l'utilisation d'un module géométrique chez des rats, puis des enfants et finalement des adultes. Lors de cette dernière expérience, Hermer et Spelke (1996) suggèrent même une concomitance des processus de reconnaissance de lieu et de forme géométrique chez les adultes. Wang et Spelke (2000) demandent donc à leurs sujets d'estimer des directions après désorientation dans l'obscurité. Cependant, en plus du pointage des objets, il est demandé aux sujets de retenir, puis de pointer les coins de la pièce rectangulaire dans laquelle ils se trouvent. Les estimations de direction des coins de la pièce sont meilleures que celles des objets. Les auteurs en déduisent que la forme géométrique générale de la pièce est encodée dans une représentation favorisant les raisonnements dans un référentiel de type allocentré. Cette représentation permanente ne se détériorerait pas lors des désorientations du corps.

Finalement, Wang et Spelke (2002) concluent que pour naviguer les humains doivent former, maintenir et actualiser une représentation de leur relation temporaire avec les éléments de l'environnement. Cependant, lorsque ce processus de type égocentré n'est pas utilisable pour cause de désorientation, les sujets naviguants ont recours à la forme géométrique de l'environnement (allo) dans la mesure où celle-ci a pu être encodée antérieurement.

Pourtant, en reproduisant les expériences de désorientation de Wang et Spelke (2002) en environnement familier et inconnu, Holmes et Sholl (2005) ne trouvent pas de différence entre les performances obtenues en environnement familier ou inconnu d'une part, et avant ou après désorientation d'autre part. Holmes et Sholl (2005) suggèrent que si une représentation de type allocentré demandait du

temps pour se construire, alors les sujets ayant appris la nouvelle pièce ne pourraient solliciter qu'un référentiel de type égocentré. Par ailleurs, s'il fallait être désorienté pour utiliser une représentation allocentrée, alors les résultats seraient moins bons en environnement nouveau qu'en environnement familier. Finalement, ils concluent qu'une représentation spatiale peut être encodée directement dans un référentiel de type allocentré d'une part, et qu'elle est utilisée dès que disponible d'autre part.

Devant la discordance entre leurs résultats et ceux de Wang et Spelke (2002), Holmes et Sholl (2005) soulèvent une différence expérimentale pouvant expliquer en partie ces variations. En effet, le niveau de précision des encodages des configurations est différent. Là où Holmes et Sholl (2005) interrogent sur de larges éléments distants en grand espace, c'est-à-dire de façon peu précise, Wang et Spelke (2002) demandent à leurs sujets de pointer précisément des objets de tailles réduites dans un environnement moins vaste. Ainsi, Holmes et Sholl (2005) admettent que l'absence de différence significative puisse venir du manque de précision de la configuration et qu'une série d'expériences visant à vérifier cette hypothèse serait nécessaire. Par ailleurs, ces dernières études posent question quant à l'influence de la configuration sur la nature de l'encodage.

2.2.2.5 L'axe intrinsèque à la configuration

Peu convaincus par les explications précédentes, Mou *et al.* (2006) interprètent ces résultats en fonction de la nature des configurations spatiales fournies par les expérimentateurs. Ainsi, pour Mou *et al.* (2006) la configuration extérieure à la pièce fournie par Wang et Spelke (2000) ne permet pas aux sujets d'appréhender la configuration d'une manière générale dans le sens où les sujets ne peuvent pas « connecter » les points de repères entre eux (*cf.* figure 2.11). Cette configuration ne se prête donc pas à un encodage de type allocentré. A l'inverse, la configuration spatiale des expériences de Holmes et Sholl (2005) est particulièrement propice à la construction d'une représentation de type allocentré puisqu'il s'agit du campus dans lequel évoluent les sujets étudiants et qu'il y a donc de fortes chances pour que ces derniers utilisent régulièrement la carte géographique de celui-ci.

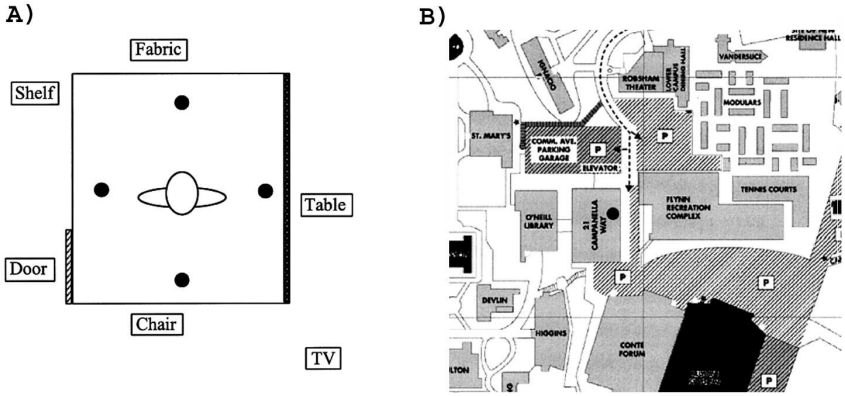


Figure 2.11 – Exemple de configurations utilisées par Wang et Spelke (2000) à gauche (A) et Holmes et Sholl (2005) à droite (B). D'après Mou *et al.* (2006), la configuration A, dont les éléments sont hors de la pièce et ne peuvent donc pas être perçus globalement, se prêtent peu à un encodage de type allocentré. A l'inverse, la configuration B, constituée par le campus dont les étudiants ont certainement déjà consultée la carte, est plus adaptée à la construction d'une représentation de type allocentré. Mou *et al.* (2006) suggèrent que les différences entre les résultats des deux études précédentes viennent de la différence de complexité des configurations.

A leur tour, Mou *et al.* (2006) répondent par une série d'expériences cherchant à préciser un modèle de coordination des référentiels de type égo et allocentrés et plus précisément à identifier les conditions d'utilisation d'une représentation de type allocentré en fonction de la configuration. Ainsi, Mou *et al.* (2006) proposent à leurs sujets deux configurations. Au sein de la première il est possible d'organiser les objets suivant des lignes et des colonnes (*cf.* figure 2.12.A), ce que les auteurs appellent des « axes intrinsèques à la configuration ». Dans la seconde, il n'y a pas d'axe intrinsèque à la configuration (*cf.* figure 2.12.B). Les résultats montrent que la désorientation n'altère les performances des sujets qu'à la suite de l'exploration de la configuration sans axe intrinsèque de référence.

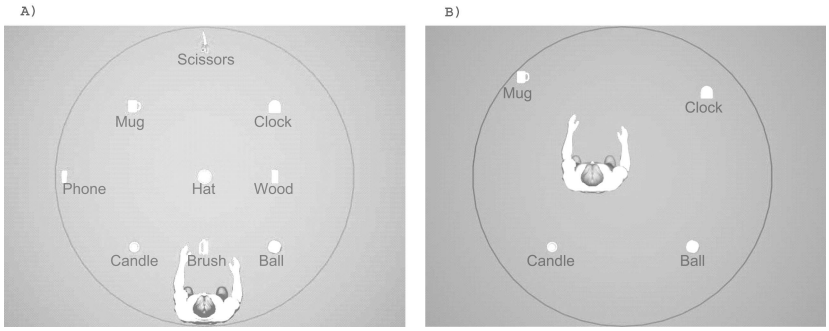


Figure 2.12 – Exemple de configurations utilisées par Mou *et al.* (2006). A gauche les éléments de la configuration A peuvent être organisés en lignes et en colonnes. Ils constituent des axes intrinsèques à la configuration ; alors qu'à droite la configuration B ne comporte pas d'axe intrinsèque.

Mou *et al.* (2006) synthétisent un modèle articulant deux systèmes. En premier lieu, le système égocentrique recueille les informations éphémères de nature sensorimotrice en cours d'action. Ces informations sont rapidement oubliées si elles ne sont pas intentionnellement réinvesties. A l'inverse, le système environnemental encode de façon durable les informations spatiales familières ou nécessaires à l'établissement d'une représentation de type allocentré. Cependant la représentation issue de ce système est dépendante de l'orientation de la configuration. Ainsi, en accord avec Shelton et McNamara (2001), Mou *et al.* (2006) avancent que les relations entre le sujet et les objets d'une part, et entre objets d'autre part, sont majoritairement dépendantes d'un axe intrinsèque de référence de la configuration de l'environnement.

Mou *et al.* (2008) définissent par la suite « un cadre de référence intrinsèque ». Ce dernier, de type allocentré, est fondé sur un axe constitué par l'alignement d'au moins deux éléments de la configuration. Pour Mou *et al.* (2008), l'encodage de configurations spatiales est réalisé par rapport à cet axe. Ainsi, les formes seraient plus facilement reconnues lorsqu'elles comportent un axe parallèle à la direction de référence. Finalement, les résultats des dernières expériences de Mou *et al.* (2008) montrent que l'encodage des représentations spatiales s'inscrit dans un référentiel de type allocentré et conserve les relations objets-objets par rapport à la direction intrinsèque de référence.

2.2.2.6 La régularité de la configuration

Accordant également de l'importance aux configurations, Easton et Sholl (1995) contestent les travaux de Rieser (1989). Au cours de cette expérience de translation et de rotation des sujets, l'auteur montrait que l'encodage spatial se fait directement dans le référentiel allocentré (*cf.* §2.2.2.1 p.62). Pour Easton et Sholl (1995) le référentiel spatial de la représentation utilisée est fondamentalement de type égocentré. Afin de tester cette hypothèse, ces auteurs se livrent à des expériences proches de celles de Rieser (1989), à la différence que les sujets apprennent des configurations spatiales régulières (distances individu-objets constantes) ou irrégulières (distances individu-objets variables) avant d'être interrogés en condition de translation (*cf.* figure 2.13).

En configuration irrégulière, les temps de réponses augmentent de façon linéaire en fonction de la distance entre le point d'observation initial et celui imaginé. Pour Easton et Sholl (1995), ces résultats indiquent que les sujets réalisent des opérations pour translater les coordonnées de l'objet-cible depuis le référentiel centré sur leur position initiale vers le référentiel centré sur la position imaginée. D'une manière générale, les temps de latence sont plus courts lorsque les objets-cibles sont situés devant les individus que lorsqu'ils se trouvent derrière.

En configuration régulière, les résultats sont identiques à ceux de Rieser (1989). Les auteurs admettent ici qu'un encodage spatial de type allocentré est plausible dans le cas d'une translation mentale ou les distances individus-objets sont constantes.

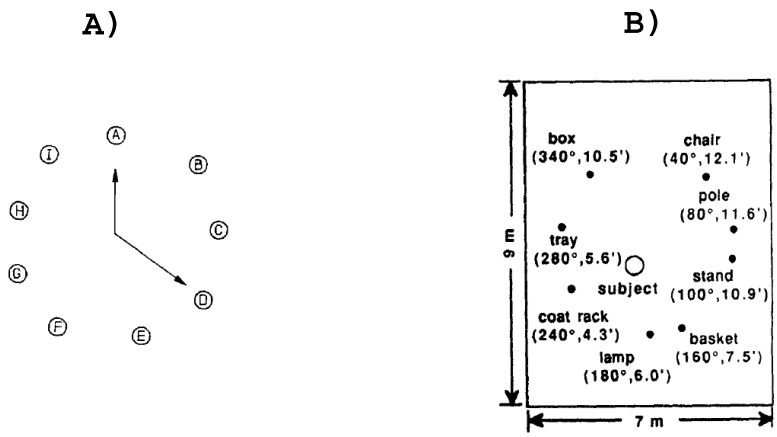


Figure 2.13 – Illustration des configurations spatiales régulière de Rieser (1989) (A) et irrégulière de Easton et Sholl (1995) (B). La différence entre ces deux configurations réside dans la distance entre le sujet et les objets. Dans la configuration A, les distances sujets-objets sont toujours identiques alors que dans la configuration B elles varient.

Les résultats des travaux d'Easton et Sholl (1995) nuancent donc largement les conclusions de Rieser (1989). Pour ces auteurs, la translation affecte la représentation spatiale de la même manière que la rotation. Par contre, le référentiel spatial d'apprentissage de l'environnement est dépendant de la régularité de la disposition spatiale des objets. Ainsi, face à une configuration régulière, l'encodage semble plus facilement de type allocentré alors que pour une configuration irrégulière les sujets paraissent encoder les relations spatiales au sein d'un référentiel de type égocentré.

En résumé, le modèle de coordination des référentiels d'Easton et Sholl (1995), confirmé par les travaux de Sholl et Nolin (1997) et Holmes et Sholl (2005), avance que les relations entre l'individu et les éléments de l'environnement sont encodés dans un référentiel de type égocentré en utilisant les axes intrinsèques du corps (Bryant *et al.*, 1992; Bryant et Tversky, 1999; Franklin et Tversky, 1990). Pour ces auteurs, bien que les relations objets-objets puissent être encodées dans un référentiel de type allocentré dans le cas particulier de la configuration régulière, le système dominant est l'actualisation permanente des relations individu-objets, c'est-à-dire des relations de type égocentré.

2.2.2.7 Le nombre d'éléments de la configuration

Critiquant ces études, Hodgson et Waller (2006) suggèrent que les résultats de Wang et Spelke (2002), Holmes et Sholl (2005) et Mou *et al.* (2004, 2006) proviennent des faibles nombres d'objets constituant les configurations à apprendre (toujours inférieur à dix). Ainsi, Hodgson et Waller (2006) réitèrent ces expériences en utilisant des configurations spatiales comportant un nombre croissant d'éléments allant jusqu'à quinze points remarquables (*cf.* figure 2.14). Les résultats montrent que la précision des estimations est indépendante du nombre d'éléments de la configuration. Par contre, les

temps de réponses augmentent avec le nombre d'éléments.

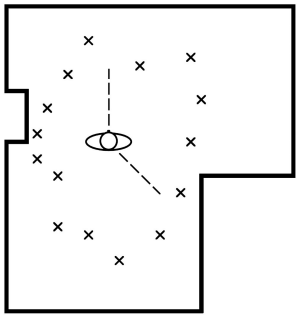


Figure 2.14 – Illustration de la configuration irrégulière à 15 points remarquables de Hodgson et Waller (2006).

Pour les auteurs, s'il n'y a pas de limite significative de la capacité d'encodage entre un et quinze éléments. Cela signifie que l'actualisation d'une représentation temporaire en mémoire à court terme ne peut suffire pour cette tâche. De plus, l'accroissement des temps de réponse suggère que la consultation d'une représentation durable de type allocentré en mémoire à long terme demande nécessairement un effort cognitif plus important.

En résumé, Hodgson et Waller (2006) avancent que les processus de types égo et allocentrés ne fonctionnent pas en « série », comme avancé par les auteurs précédemment cités mais plutôt en « parallèle ».

2.2.2.8 Une classification des paramètres influençant l'encodage

La grande quantité d'études décrites ci-dessus révèle donc l'influence de différents paramètres sur l'encodage des représentations spatiales dans les référentiels spatiaux de types égo ou allocentrés. Deux principales catégories de paramètres influencent les encodages de types égo et allocentrés : l'orientation du sujet et la configuration de l'environnement. Ainsi, les rotations et translations, les mouvements, le point de vue initial d'encodage et la désorientation du sujet d'une part ; et l'axe intrinsèque, la régularité et le nombre d'éléments de la configuration d'autre part, paraissent déterminants. Une présentation synthétique des positions des différents auteurs est représentée dans l'« *espace des référentiels* » ci-dessous *cf.* figure 2.15.

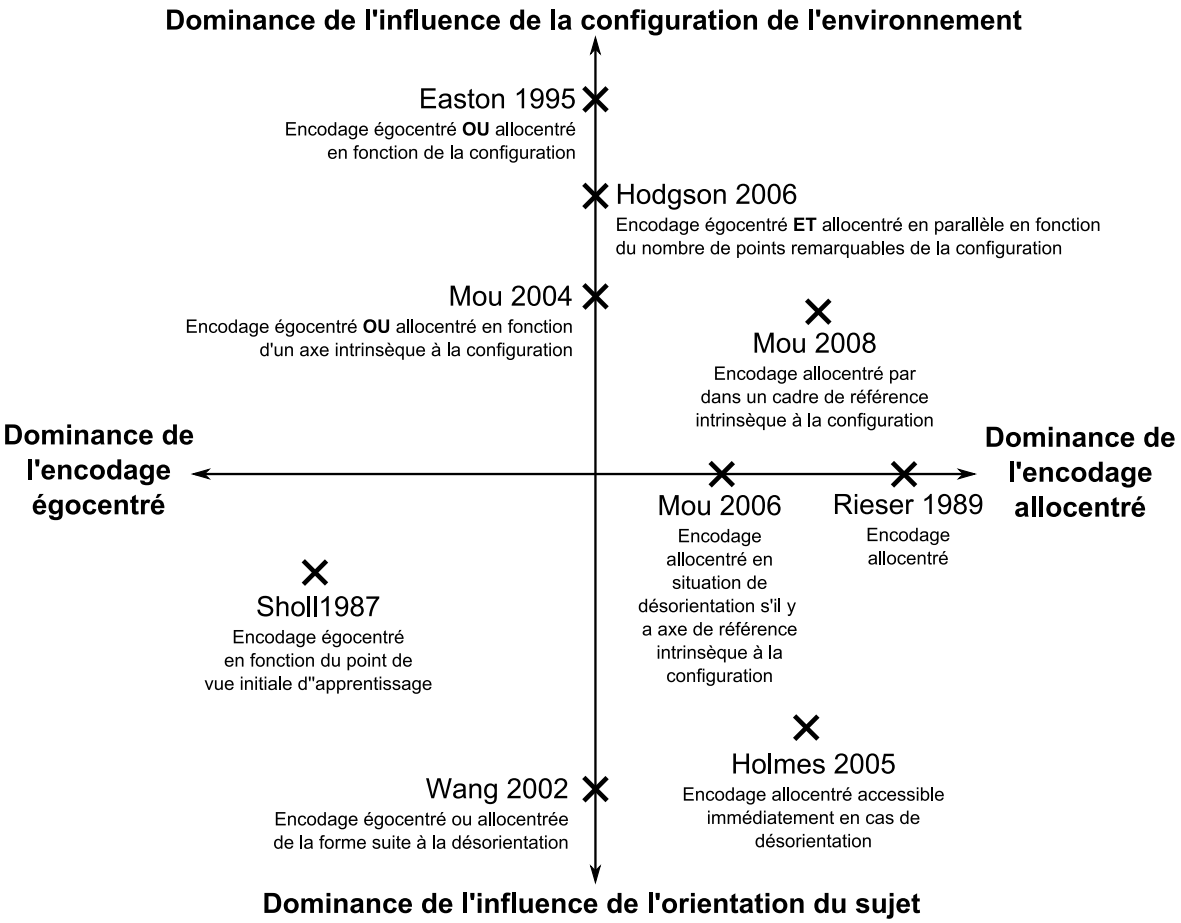


Figure 2.15 – L'« *espace des référentiels* » illustre les positions des différents auteurs sur l'influence des paramètres de la configuration et de l'orientation pour l'encodage des représentations spatiales dans les référentiels de types égo ou allocentrés. Sur cette figure l'axe horizontal indique la prépondérance des encodages de types égo ou allocentrés de la gauche vers la droite. Sur l'axe vertical est positionnée l'importance qu'accordent les auteurs aux paramètres de la configuration de l'environnement et de l'orientation du sujet sur la nature de l'encodage.

Burgess (2006) résume les raisons qui témoignent d'une cohabitation entre des représentations de type égocentré précises mais temporaires et des représentations de type allocentré durables et globales de la configuration de l'environnement. Pour cet auteur, bien que l'encodage de type égocentré puisse suffire à la construction d'une représentation de même nature, la représentation allocentrée est également construite depuis des informations de type égocentré directement issues de notre système perceptif. Par contre, elles doivent subir une transformation mentale pour s'abstraire du point de vue du sujet et devenir une représentation durable en mémoire à long terme. Les actions spatiales sont donc nécessairement de type égocentré puisqu'incarnées (Burgess, 2006). Ainsi, l'utilisation d'une représentation de type allocentré implique qu'elle soit convertie dans un référentiel de type égocentré afin de permettre au sujet d'agir. Autrement dit, la navigation en grand espace sollicite la coordination

des axes du corps (devant, derrière...) avec des repères extérieurs (nord, sud...) (Burgess, 2001).

2.2.3 Les modèles de coordination des référentiels spatiaux

Dès 1975, des auteurs avancent que nous construisons de « multiples mini-représentations spatiales » au cours de nos navigations avant de construire une « représentation spatiale cohérente et unifiée » (Siegel et White, 1975). Il s'agit donc d'associer un ensemble de points de vue spécifiques pour abstraire une représentation plus globale. Loomis et Beall (1998) prétendent qu'un référentiel de type égocentré est majoritairement utilisé pour éviter les obstacles alors que le référentiel de type allocentré est sollicité lors de la planification d'itinéraires. Ces deux référentiels semblent donc essentiels à l'activité de navigation.

Bien que les êtres vivants semblent favoriser certains types de référentiel en fonction des situations, il paraît nécessaire de coordonner les systèmes de types égo et allocentrés (O'Keefe et Nadel, 1978; Zipser, 1986) pour l'élaboration de représentations spatiales permettant les meilleures performances dans l'environnement.

2.2.3.1 Le modèle de Kosslyn

A partir d'expériences sur l'imagerie mentale, Kosslyn *et al.* (1990) érigent un modèle de coordination des représentations issues des référentiels spatiaux de types égo et allocentrés. Amorim et Stucchi (1997) proposent une simplification de ce modèle (*cf.* figure 2.16).

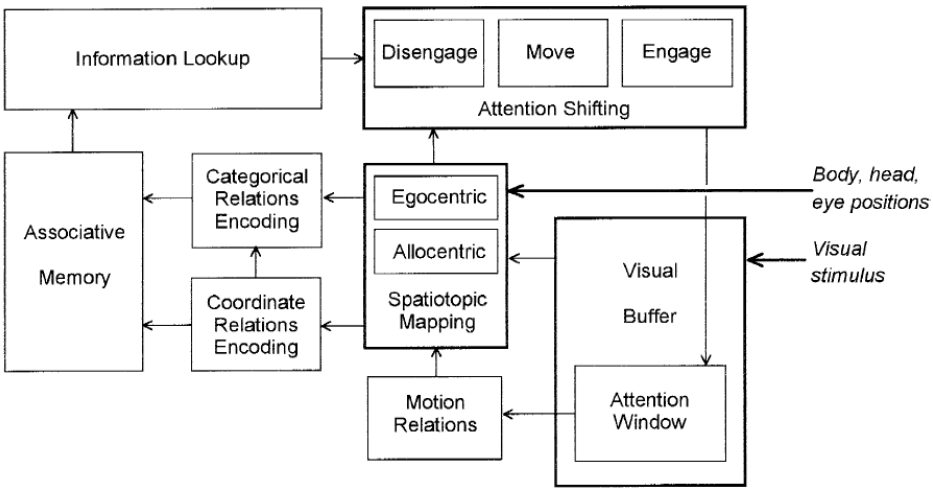


Figure 2.16 – Le modèle visuo-spatial de Kosslyn *et al.* (1990) simplifié par Amorim et Stucchi (1997).

D'une façon générale, les auteurs expliquent que les stimuli des différentes modalités convergent vers la « mémoire spatiotopique » (« *spatiotopic mapping* ») où les informations issues des référentiels

de types égo et allocentrés sont encodées. A ce niveau, les informations deviennent des représentations spatiales. Leurs contenus peuvent être encodés en termes de coordonnées ou de catégories (« *categorical* [*and*] *coordinates relations encoding* »). L'encodage des coordonnées peut être réalisé dans un référentiel de type égocentré (« Le Moulin Blanc se trouve à 30° degrés sur bâbord ») ou allocentré (43°23'Nord ; 4°26'Ouest). L'encodage des catégories peut également s'inscrire dans un référentiel de type égocentré (« Le Moulin Blanc est à gauche ») ou allocentré (« Le Moulin Blanc est au Nord d'*Océanopolis* »). Ensuite, ces représentations sont comparées aux existantes dans la mémoire associative (« *associative memory* »). Pour les besoins de l'action en cours, l'accès à ces représentations spatiales passe par un processus attentionnel (« *attention shifting* ») dont le fonctionnement consiste à parcourir les images mentales construites en mémoire de travail (« *information lookup* »). La régulation de l'action s'opère au moyen d'allers et retours entre les images internes sélectionnées (« *attention shifting* ») et les images visuelles (« *visual buffer* »).

Tout en illustrant la complémentarité des informations de types égo et allocentrés, ce modèle semble accorder une importance toute particulière à la modalité visuelle.

2.2.3.2 Le modèle de Thinus-Blanc

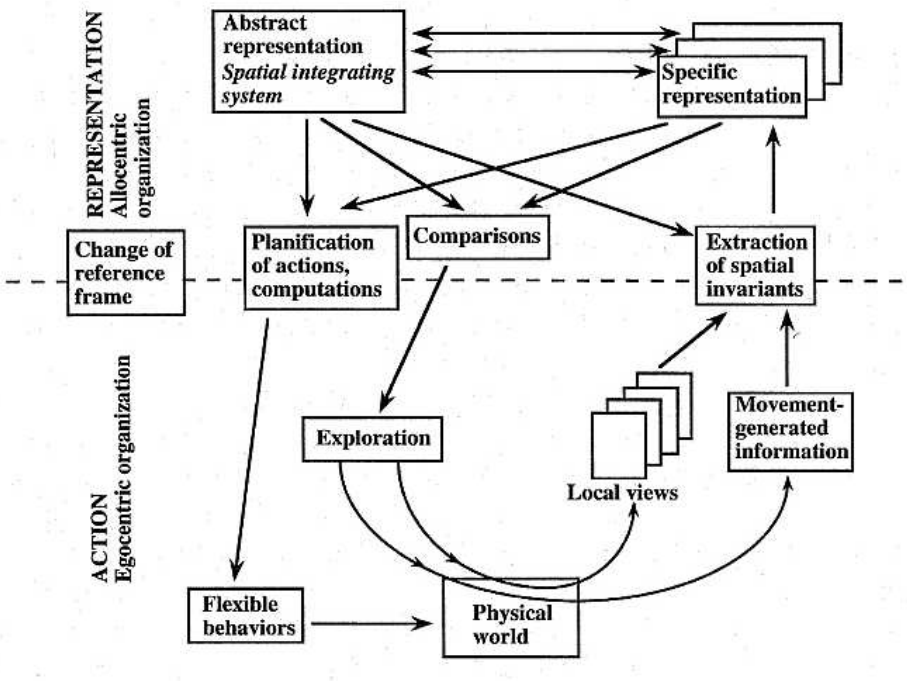


FIGURE 2.17 – Le modèle de coordination des référentiels de type et égo et allocentrés de Thinus-Blanc (1996).

Thinus-Blanc (1996) propose un modèle plus général de coordination des référentiels spatiaux fai-

sant abstraction de la prédominance de la modalité visuelle. L'auteur s'appuie sur la théorie constructiviste de Neisser (1967) selon laquelle les « schémas » sont des entités fonctionnelles modifiées au fur et à mesure de leur interactions avec l'environnement devenant ainsi des plans pour diriger les actions.

Dans son modèle, Thinus-Blanc (1996) dissocie la navigation dans l'espace environnemental (« *ACTION* ») et la représentation de celle-ci dans l'espace mental (« *REPRESENTATION* ») (*cf.* figure 2.17).

Pour cet auteur, la navigation s'inscrit nécessairement dans un référentiel de type égocentré (« *Egocentric organization* ») puisqu'au fur et à mesure de ses déplacements (« *flexible behaviors* ») les informations perçues par un individu sont ses mouvements (« *movement generated information* ») d'une part, et l'encodage des positions des autres éléments de l'environnement depuis ses positions successives (« *local views* ») d'autre part. A l'inverse les représentations s'inscrivent dans un référentiel de type « allocentré » (« *allocentric organization* »). S'inscrivant dans la logique constructiviste, Thinus-Blanc (1996) explique que la construction de ces « cartes cognitives », indépendantes de la position et de l'orientation du sujet au cours de la navigation, provient des perceptions issues de la navigation (« *local views* »). Ainsi, l'extraction d'invariants spatiaux (« *extraction of spatial invariants* »), basés sur des repères communs entre les perceptions et le schéma général (« *abstract representations* »), permettrait l'élaboration de multiples représentations (« *specific représentations* »), assimilables à des configurations. Ensuite, un mécanisme d'intégration des représentations spatiales (« *spatial integration system* ») coordonnerait ces représentations spécifiques avec les représentations abstraites (« *abstract representations* »). Ces représentations de type carte (« *specific représentations* ») seraient donc issues de la fusion de multiples représentations de type route (« *local views* »). Finalement, ces représentations seraient comparées aux existantes et permettraient de planifier et réguler l'action (« *planification of action, computations* »). Dans ce sens, il s'agit donc d'une boucle « action-perception-représentation-action... » où les référentiels de types égo et allocentrés sont coordonnés.

Finalement, Thinus-Blanc (1996) attribue la construction de représentations spatiales de type allocentré à des transformations mentales sur des informations de type égocentré directement extraites de nos actions dans l'environnement.

2.2.4 Conclusion sur les référentiels spatiaux

Les référentiels de types égo et allocentrés sont donc les deux principaux cadres de référence de la représentation spatiale. Si le premier semble très accessible et permet surtout d'agir sur l'environnement, le second se révèle plus indirect mais offre la possibilité de se représenter l'espace de navigation. Les deux systèmes se construisent en parallèle et participent conjointement au repérage dans l'espace. En fonction des informations disponibles (points remarquables, structures de l'environnement), un des deux systèmes peut dominer. Lors de la mémorisation de l'espace, les paramètres relatifs à l'orientation

du sujet et à la nature de la configuration semblent influencer tout particulièrement l'encodage des représentations. Il s'avère finalement que la coordination des représentations issues des référentiels de types égo et allocentrés nécessite des allers et retours entre des processus ascendants et descendants.

2.3 Synthèse sur la navigation et les référentiels

En résumé, la construction de l'espace chez l'enfant est une suite de décentrations progressives. Ces dernières sont le résultat des processus ascendants et descendants. Chez l'adulte, l'élaboration d'une représentation mentale de la configuration d'un espace procède de la même démarche. Elle nécessite d'identifier des points remarquables et des routes avant de les connecter entre elles. Ainsi se forment les cartes cognitives spatiales. L'élaboration de ces sortes de cartes mentales implique deux types de point de vue complémentaires. Le point de vue du sujet s'inscrit dans un référentiel de type égocentré alors que le point de vue aérien s'inscrit dans un référentiel de type allocentré. De nombreuses expériences montrent que différents paramètres jouent un rôle dans l'encodage des représentations spatiales. Il apparaît alors que l'orientation du sujet et les caractéristiques de la configuration exercent des influences prépondérantes. Des études récentes proposent une utilisation en parallèle des référentiels de types égo et allocentrés. Les modèles de coordination suggèrent que la construction de représentations spatiales de type allocentré se réalisent principalement à partir d'actions se déroulant nécessairement depuis le point de vue du sujet soit dans un référentiel de type égocentré. Finalement, il s'avère que les représentations issues des deux types de référentiel sont nécessaires afin de pouvoir agir et se repérer dans l'environnement. Mais dans quels termes le problème se pose-t-il en situation de cécité ?

Chapitre 3

Cécité et Cartographie

La construction de représentations de type carte résulterait de la participation des deux types de référentiels spatiaux. Un référentiel de type égocentré associé à l'action participerait au repérage par des processus ascendants. Un référentiel de type allocentré lié à des représentations plus générales de l'espace fournirait des repères par des processus descendants. Ces coordinations émanent des perceptions des sujets de leurs actions dans l'environnement. Que se passe-t-il alors quand ces perceptions sur l'environnement sont limitées par l'absence de vision ?

3.1 La représentation spatiale sans vision

Les individus privés de la vue disposent-ils des mêmes capacités de raisonnement spatial que les personnes voyantes ?

Les difficultés de déplacements des personnes non-voyantes sont-elles dues à des perceptions spatiales limitées ou à un déficit de raisonnement sur l'espace ?

3.1.1 La terminologie

Avant de préciser les différents travaux relatifs à la navigation spatiale des personnes non-voyantes, nous souhaitons préciser trois points. Tout d'abord, nous utilisons indifféremment les termes « non-voyant » et « aveugle ». En effet, les personnes concernées utilisant elles-mêmes ce second terme, son emploi n'est pas péjoratif. Ensuite, nous n'éviterons pas particulièrement les termes visuels pour expliquer des processus non visuels. En effet, les aveugles ont fréquemment recours à ce type de vocabulaire. Par exemple, le point de vue initial d'encodage pourra être utilisé pour parler de la position et de l'orientation d'un aveugle découvrant une carte en relief. Finalement, il se révèle important de faire la différence entre les aveugles de naissance (congénitaux) et les aveugles tardifs (ou accidentels). Alors que les premiers sont nés sans vision, les seconds ont perdu la vue ultérieurement. Ainsi, à la diffé-

rence des aveugles de naissance, les aveugles tardifs peuvent utiliser la vision pour la compréhension des concepts spatiaux et se référer à leurs souvenirs visuels au cours de la vie. La question de l'impact de l'âge auquel un individu perd la vue se pose donc. D'après Schlaegel (1953), seules les personnes ayant perdu la vue après l'âge de sept ans peuvent tirer profit de la vison pendant leur développement et utiliser leurs souvenirs visuels par la suite. Cependant, l'absence de différence significative dans les résultats des expériences de cet auteur limite la portée de ses propos. Par ailleurs, Hatwell (2003) observe des coordinations précoces entre les modalités perceptives dès le plus jeune âge et propose la limite de trois ans pour différencier aveugles congénitaux et tardifs. Nous adopterons cette dernière définition.

3.1.2 De la théorie de la *Déficience* à la théorie de la *Différence*

L'absence de vision a longtemps laissé penser que les personnes aveugles souffraient d'un déficit dans leur capacité à raisonner sur l'espace. Dès le dix-septième siècle, le célèbre « problème de Molyneux » suscite la curiosité des grands penseurs. Ainsi, au cours de ses correspondances, le philosophe irlandais Molyneux sollicite l'avis de l'empiriste anglais Locke sur l'éventuelle capacité d'un aveugle de naissance, qui aurait soudainement retrouvé la vue, à distinguer un cube d'une sphère sans les toucher. Partisan du principe de la construction de l'abstraction au fur et à mesure de nos expériences perceptives, la réponse de Locke est négative. Selon lui, un aveugle retrouvant la vue ne pourrait pas différencier une sphère d'un cube sans contact tactile. Autrement dit, les informations issues de chaque modalité sensorielle seraient scindées et l'intégration d'un concept spatial et strictement associées à leur canal perceptif d'entrée. A ce propos, les travaux de Carreiras et Codina (1992) défendent l'idée opposée d'une représentation spatiale dite « amodale ». Pour ces auteurs, lorsque les informations sur l'espace donnent lieu à l'élaboration de concepts spatiaux, ces derniers se détachent des modalités sensorielles d'entrée et relèvent plus de l'intelligence que de la perception. Selon une position plus nuancée, Millar (1994) suggère que « l'ensemble des modalités sensorielles convergent et se superposent pour la construction d'une représentation spatiale multimodale » (p.35). Ainsi, la privation d'informations visuelles ne devrait pas perturber fondamentalement les raisonnements spatiaux. Cependant les chercheurs ont tenu différentes positions sur ce sujet.

Au cours du vingtième siècle, les théories de la *Déficience*, de l'*Inefficacité* et de la *Différence* se succèdent (Fletcher, 1980).

La théorie de la *Déficience* est la plus ancienne et la plus radicale. Pour von Senden (1932), les informations visuelles perçues pendant les premières années de la vie sont essentielles pour une compréhension minimale de la notion d'espace. La représentation spatiale serait directement dérivée des images visuelles et il serait donc impossible aux aveugles de naissance d'intégrer les concepts spatiaux. L'ensemble des travaux ultérieurs réfute cette idée.

A l'inverse, selon **la théorie de l'*Inefficacité***, les personnes non-voyantes disposent d'un potentiel de raisonnement spatial comparable à celui des personnes voyantes. Cependant, l'absence de vision entraînerait une pauvreté dans la prise d'informations sur l'espace. Les individus privés de la vue seraient donc des utilisateurs « inefficaces » des mêmes processus spatiaux que les personnes voyantes. Revesz (1950) avance que les aveugles peuvent construire des représentations spatiales de formes simples exclusivement. Les expériences de Worchel (1951) confirment ces résultats. Par ailleurs, les travaux de Hunter (1954) montrent que les personnes privées de la vue ne différencient pas une légère courbure d'une ligne droite lors de tâches de locomotion ou d'exploration manuelle. De plus, Rieser *et al.* (1986, 1992) montrent que les personnes non-voyantes connaissent des difficultés à actualiser leur position au fur et à mesure de la locomotion. D'après les résultats de ces études, il semble que le déficit de représentation globale des aveugles provient de la difficulté à percevoir les éléments distants de l'environnement.

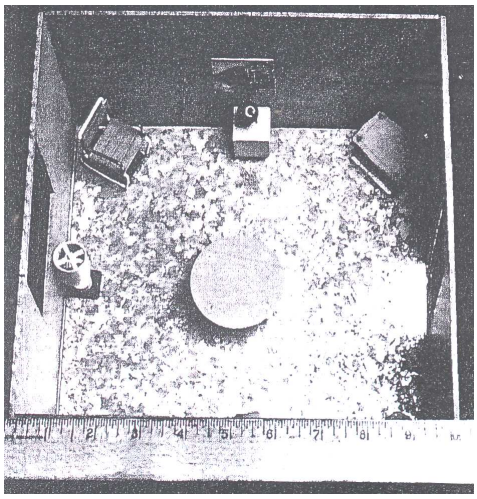


FIGURE 3.1 – Boîte de dix centimètres sur dix utilisée comme pièce comportant des meubles miniatures par Fletcher (1980). A la suite de l'exploration, il est demandé à des sujets aveugles et voyants les yeux bandés de répondre à des questions du type suivant : « quel objet se trouve dans le coin opposé à la table ? »

Plus optimiste, **la théorie de la *Différence*** avance que les capacités spatiales des personnes non-voyantes ne sont pas inférieures à celles des individus voyants mais simplement différentes. D'un point de vue fonctionnel, les représentations spatiales des aveugles seraient donc équivalentes à celles des voyants. Cependant, elles se développeraient plus lentement et par d'autres modalités. Partisans de cette théorie, Passini et Proulx (1988) rappellent que certains résultats provenant de la théorie de l'*Inefficacité* sont dus à des biais expérimentaux. En effet, Juurmaa (1965) remarque que Worchel (1951) utilise des formes « familières à la vision ». L'auteur réitère cette expérience avec des informations auditives et haptiques. Les résultats révèlent une absence de différences entre les sujets voyants, non-voyants accidentels et non-voyants de naissance. Passini et Proulx (1988) expliquent donc que

la théorie de l'*Inefficacité* s'appuie sur des résultats provenant notamment de tâches expérimentales inadaptées à la cécité. D'autres expériences montrent que la vision n'est pas la condition nécessaire et suffisante à l'élaboration de représentations spatiales (Leonard et Newman, 1967; Millar, 1976). Par exemple, Fletcher (1980) réalise une expérience où elle demande à des sujets voyants et non-voyants d'explorer une boîte de dix centimètres sur dix représentant une pièce en maquette. A l'intérieur se trouvent des meubles miniatures tels un fauteuil, une table, etc... (*cf.* figure 3.1). Après une séquence d'apprentissage, l'expérimentateur questionne les sujets sur les positions relatives des différents éléments. Ne trouvant pas de différence entre le groupe de personnes voyantes les yeux bandés et le groupe de personnes non-voyantes, l'auteur conclut que la vision n'est pas nécessaire pour l'acquisition des concepts spatiaux. En accord avec les conclusions de Fletcher (1980), Morrongiello *et al.* (1994) demandent à leur tour à des sujets aveugles et voyants les yeux bandés, âgés de trois à huit ans, de reconnaître des objets sans la vision. Les évaluations de la rapidité et de la précision des réponses montrent que l'expérience visuelle n'influence pas leurs performances. D'après ces auteurs, il semble que les *patterns* d'exploration haptique évoluent avec l'âge de la même façon chez les sujets aveugles ou voyants. Pourtant, Kitchin *et al.* (1997) nuancent ces résultats en montrant que si l'absence de vision ne limite pas le développement des capacités spatiales, elle les ralentit. En effet, bien que Millar (1988) souligne que les personnes aveugles semblent avoir le *potentiel cognitif* nécessaire pour la construction des concepts spatiaux, force est de constater que leur expérience spatiale perceptive est moindre.

Finalement il semble que la littérature reste contradictoire quant à l'existence de différences entre les capacités spatiales des aveugles de naissance, des aveugles tardifs et des voyants les yeux bandés. Ainsi, les résultats des expériences de Byrne et Salter (1983), Dodds et Carter (1983), Hollins et Kelley (1988), Rieser *et al.* (1982, 1986, 1992) et Veraart et Wanet-Defalque (1987) témoignent d'un déficit dans les performances spatiales des non-voyants congénitaux alors que les résultats des expériences de Worchel (1951), Landau (1986), Heller (1989), Passini *et al.* (1990), Ochaita et Huertas (1993), Haber *et al.* (1993), Loomis *et al.* (1993) et Klatzky (1995) montrent le contraire.

En approfondissant les résultats de différentes expériences, certains auteurs attribuent ces différences à la nature des tâches et aux processus cognitifs qu'elle implique. Aussi, d'après Dodds *et al.* (1982), Thorndyke et Hayes-Roth (1982), Rieser *et al.* (1982, 1986) et Millar (1994), lorsque la tâche sollicite les connaissances des relations spatiales entre différents endroits dont les trajets ont été effectués, les sujets ne tirent pas profit d'une expérience visuelle. A l'inverse, lorsqu'il s'agit de réaliser des inférences spatiales, c'est-à-dire relier des lieux connus mais dont les trajectoires n'ont pas été effectivement parcourues, les sujets disposant d'une expérience visuelle antérieure présentent alors de meilleures performances. Ici, les sujets aveugles de naissance semblent rencontrer plus de difficultés que les personnes privées de la vue plus tardivement à utiliser des points de vue imaginaires ou à actualiser la position des différents points remarquables en cours de déplacement .

3.1.3 L'assimilation et l'accommodation en situation de cécité

Les différentes études considérées précédemment tendent à montrer que la cécité soulève moins de problèmes de compréhension de l'espace que de difficultés face à l'actualisation. Récemment, Klatzky *et al.* (2003) définissent l'actualisation comme la capacité des individus à modifier la représentation de leur propre position par rapport à l'environnement pendant qu'ils se déplacent.

Piaget (1936) introduit l'assimilation comme le processus nous permettant d'adapter le monde à nos connaissances et l'accommodation comme celui permettant de modifier nos connaissances du monde pour nous adapter à l'environnement. En raison de la pauvreté des informations spatiales issues des modalités tactiles, kinesthésiques et auditives par rapport à celles issues de la vision, la cécité entraîne des perturbations importantes au niveau de l'accommodation. La difficulté provient de l'actualisation des connaissances de l'espace distant. Chez les aveugles, les échanges avec l'environnement physique sont diminués en même temps que s'atténue la contrainte perceptive exercée par les objets (Hatwell, 1964). Le retard du développement spatial des aveugles serait donc dû à la limitation de leur processus d'accommodation.

Afin d'évaluer les capacités d'accommodation des enfants aveugles, Hatwell (1964) propose une expérience visant à comparer trois groupes de sujets de cinq à dix ans. Le premier groupe est composé de sujets aveugles de naissance, le second de voyants les yeux bandés, le troisième est un groupe de contrôle constitué de voyants utilisant la vue. Chaque sujet touche ou observe la position d'une locomotive et de ses trois wagons sur des rails en forme de polygone irrégulier de huit côtés. L'expérimentateur place ensuite la locomotive sur un autre segment du parcours et demande aux sujets de positionner le reste des wagons du bon côté de la locomotive. Les résultats montrent que les voyants âgés de cinq ans ayant les yeux bandés ou non présentent des performances identiques à celles des aveugles de dix ans. La réussite à l'épreuve demande un acquis antérieur qui semble faire défaut aux aveugles. La représentation spatiale d'un jeune aveugle présente donc un caractère statique (dénué d'orientation cinétique et vectorielle). Cette fixation de l'objet au détriment du mouvement a pour effet de valoriser les positions absolues perçues initialement et de négliger les positions relatives liées aux déplacements. Autrement dit, les relations d'objets à objets sont difficilement intégrées.

D'après l'auteur, ce déficit serait dû à la privation du sens visuel qui fournit habituellement une connaissance globale des éléments de l'environnement distant. Bien que les perceptions auditives soient essentielles pour l'orientation dans l'espace et l'utilisation du langage, elles n'apportent qu'une connaissance très imprécise des objets eux-mêmes. Par ailleurs, bien que les perceptions haptiques (tactilo-kinesthésiques) soient actives et compensent ainsi l'exiguïté du champ perceptif de l'espace de manipulation, elles n'en restent pas moins fragmentaires et successives comparativement à la vue dont le champ perceptif est infiniment plus vaste.

Pour résumer, il semble que l'absence de perceptions visuelles ne limite pas les capacités de raisonnement sur l'espace mais entrave l'actualisation des informations spatiales et l'encodage de représentation globale de type allocentré utilisant majoritairement les perceptions d'éléments distants.

3.1.4 Conclusion sur la représentation spatiale sans vision

Bien que les théories et les positions se révèlent parfois contradictoires, les études les plus récentes tendent à montrer que les aveugles ne souffrent pas de déficit du raisonnement spatial. Malgré cela, certains auteurs soulignent tout de même de plus importantes difficultés des aveugles de naissance à réaliser des inférences spatiales. Mais le principal problème des personnes non-voyantes réside dans l'actualisation des informations en cours de déplacement. En effet, les mécanismes d'accommodation en situation de locomotion semblent souffrir de la faible quantité d'informations sur l'espace distant induite par l'absence de la modalité visuelle.

3.2 L'équipement perceptif non visuel

Bien que Foulke (1982) rappelle que la vision est la seule modalité à permettre la perception de l'espace dans son ensemble, Millar (1988) souligne qu'elle n'est pas la seule modalité sensorielle fournissant des informations spatiales. Illustrant ce dernier propos, les résultats de recherches récentes montrent que les représentations issues des différentes modalités sont tout aussi fonctionnelles (De Vega *et al.*, 2001; Loomis *et al.*, 2002; Avraamides *et al.*, 2004).

Comment l'audition et le toucher participent-ils à la perception de l'espace ?

Quels espaces ces deux sens construisent-ils ?

Quel rôle joue la locomotion en tant qu'outil d'exploration de l'espace ?

3.2.1 La modalité auditive et la construction de l'espace

En l'absence de vision, l'audition paraît être la modalité la plus favorable à la perception des stimuli de l'espace distant. Néanmoins, elle n'est pas pour autant une modalité spatiale par excellence. En effet, en proposant une tâche à consignes « ambiguës » à des enfants aveugles et voyants, Hermelin et Connor (1971) obtiennent des réponses de localisation spatiale plus fréquentes chez les enfants disposant de la vision. O'Connor et Hermelin (1972) comparent les réponses de sujets sourds et de sujets aveugles lors d'une tâche d'ordination de stimuli visuels et auditifs. Si les premiers répondent plutôt de façon spatiale, les seconds répondent plutôt de manière temporelle. Ces résultats montrent que les perceptions auditives s'organisent plus spontanément de manière temporelle que spatiale.

Cependant, bien que l'audition soit plus efficace dans le domaine temporel, elle peut également fournir des informations spatiales de direction et de distance (Golledge, 1993). A ce propos, Loomis *et al.* (1998b) comparent les précisions des localisations de cibles perçues à travers les modalités auditives ou visuelles. Dans cette expérience, les auteurs demandent aux sujets d'atteindre une cible en marchant après la perception de stimuli visuels ou auditifs. Les sujets ne s'élancent qu'une fois que les stimuli ont cessé. Les sujets réalisent des trajets directs ou indirects, c'est-à-dire qu'ils passent par un point additionnel ou non. Les performances réalisées en condition visuelle se révèlent systématiquement supérieures qu'il s'agisse de trajets directs ou indirects. Bien que les réponses en situation auditive témoignent de la construction d'une représentation spatiale peu précise, ces dernières présentent une certaine similarité avec la configuration initiale (*cf.* figure 3.2).

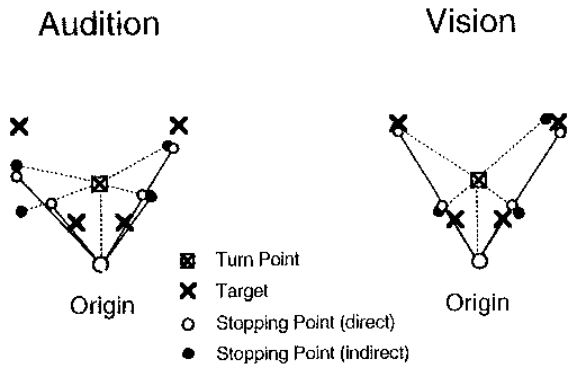


FIGURE 3.2 – Performances moyennes des sujets lors des expériences de locomotion suite à la perception de stimuli auditifs ou visuels. Cette figure est une adaptation de celle de Loomis *et al.* (1998b). Les illustrations de gauche concernent la modalité auditive ; celles de droite, la modalité visuelle. La position des sujets est indiquée par le grand cercle blanc alors que les positions des cibles (*target*) sont représentées par les croix. La croix inscrite dans le carré matérialise le point (*turn point*) par lequel les sujets passent en condition indirecte. Les petits cercles blancs indiquent les positions finales moyennes des sujets en condition de trajet direct (*stopping point (direct)*). Les petits cercles noirs indiquent les positions finales moyennes des sujets en condition de trajet indirect (*stopping point (indirect)*).

3.2.1.1 La perception de la direction d'une source sonore

Au début du vingtième siècle, Lord Raleigh (1894) observa que la perception de la direction d'une source sonore est basée sur la différence entre les trajets empruntés par le son pour atteindre chacune des deux oreilles. Mac Adams (1994) explique qu'une onde sonore venant de côté arrivera d'abord à l'oreille proche de la source avant d'atteindre l'autre oreille. La différence de temps d'arrivée du son entre les deux oreilles est variable en fonction de l'azimut (*cf.* figure 3.3). Nous ne pourrions donc pas percevoir la direction d'une source sonore si nous n'avions qu'une oreille. Finalement, même si la direction d'une source sonore semble évaluée avec peu de précision, cette perception renseigne à elle seule sur la direction approximative dans laquelle se trouve sa source (Blauert, 1983, 1997;

Middlebrooks et Green, 1991). Ce processus, directement dépendant de la position et de l'orientation de la tête des individus, s'inscrit dans un référentiel de type égocentré.

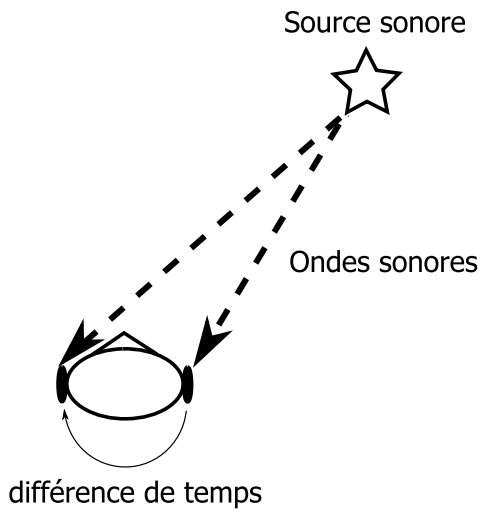


Figure 3.3 – Perception auditive binaurale. La différence de temps entre les arrivées de l'onde sonore aux oreilles droite et gauche permet au système nerveux d'interpréter un azimut.

3.2.1.2 La perception de la distance d'une source sonore

Ashmead *et al.* (1990) montrent que plus le son est familier plus il est perçu précisément. En effet, la perception de la distance d'une source sonore est dépendante de l'intensité du son. Il est donc nécessaire de disposer d'un volume sonore de référence pour évaluer la distance de sa source. Cette contrainte limite la précision de la distance perçue dans les environnements extérieurs en raison de la présence du vent par exemple.

Ultérieurement, Ashmead *et al.* (1995) demandent à leurs sujets de marcher vers des cibles sonores situées entre cinq et vingt mètres de distance. Les auteurs testent trois conditions. En condition « de mouvement », les sujets marchent vers les cibles sonores pendant qu'elles émettent un signal auditif. En condition « stationnaire », ils écoutent les sons pendant quelques secondes mais ne s'élancent que lorsque ceux-ci s'arrêtent. Finalement en condition « intermittente », les sons sont émis alternativement pendant la locomotion. Les auteurs mesurent les distances parcourues par les sujets en fonction des distances des cibles. Les résultats montrent que la condition « en mouvement » est la mieux réussie. Viennent ensuite les conditions « intermittente » et « stationnaire » (*cf.* figure 3.4).

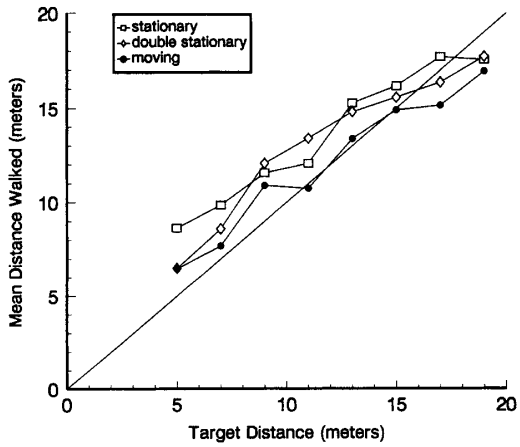


FIGURE 3.4 – Distances parcourues par les sujets en fonction des distances des cibles et des conditions. Les disques noirs correspondent à la condition « en mouvement » (*moving*). Les carrés blancs représentent la condition « stationnaire » (*stationnary*) et les losanges blancs désignent la condition intermédiaire (*double stationnary*). La ligne diagonale illustre la performance parfaite (Ashmead *et al.*, 1995).

Les auteurs concluent que les sujets tirent profit de l'évolution des relations entre leurs déplacements et les variations des informations auditives pour percevoir les distances des sources sonores. Ces résultats confirment ceux obtenus par Speigle et Loomis (1993) lors d'une expérience similaire portant sur des sons distants de deux à six mètres. Cependant les résultats de la condition « intermittente » d'Ashmead *et al.* (1995) révèlent que le mouvement n'est pas le seul responsable de l'amélioration des performances et donc de l'actualisation des perceptions auditives. En effet, il semble que le changement de « point de vue auditif » des sujets présente un intérêt pour la perception de la distance d'une source sonore. Ces résultats suggèrent que la multiplication des perceptions auditives de type égocentré favorise la précision de l'encodage d'une configuration spatiale au fur et à mesure des déplacements.

Comme souligné précédemment, l'actualisation des positions relatives des différents éléments de l'environnement en cours de navigation constitue précisément une difficulté majeure pour les aveugles. Bien que les informations auditives constituent une piste intéressante, très peu d'études s'intéressent à l'actualisation de la position dans l'espace au moyen des seules informations auditives.

Loomis *et al.* (1998a) comparent tout de même les itinéraires réalisés par des sujets aveugles lorsque ceux-ci sont guidés avec des informations verbales classiques ou avec des sons localisés dans l'espace. Les résultats montrent que les temps et les distances nécessaires pour réaliser l'itinéraire demandé sont inférieurs lorsque les sujets disposent d'informations auditives spatialisées.

En résumé, la modalité auditive semble permettre la perception d'informations de l'espace distant dans un référentiel de type égocentré.

3.2.2 La modalité haptique et la construction de l'espace

D'après Revesz (1950) la modalité haptique, ou tactilo-kinesthésique, est la principale modalité spatiale pour les personnes non-voyantes. Elle se compose de la perception cutanée (passive) qui résulte de la stimulation d'une partie de la peau de la main en contact avec les objets, et de la perception kinesthésique (active) qui résulte des stimulations inhérentes aux mouvements manuels d'exploration. Alors que la première concerne les déformations mécaniques de la peau exclusivement, la seconde y ajoute celles des muscles, des tendons et des articulations issus des mouvements volontaires notamment. Ces derniers participent à la complexité de la perception haptique. En effet, les caractéristiques intentionnelles, auto-initiées et pluri-articulaires illustrent tout particulièrement la complémentarité de l'action et de la perception (Gentaz, 2005). Ainsi, la perception haptique implique un couplage intime entre motricité et sensibilité (Streri, 2000).

3.2.2.1 L'identification des caractéristiques des objets

Certains auteurs insistent sur les mouvements exploratoires (Zinchenko et Lomov, 1960; Davidson, 1972; Lomov, 1966), alors que d'autres focalisent sur le type d'informations recherchées (Appelle et Goodnow, 1970; Appelle *et al.*, 1980; Davidson *et al.*, 1974). Intégrant ces deux idées, Lederman et Klatzky (1987) émettent l'hypothèse que les mouvements manuels observables traduisent les sensations et les intentions des sujets. Afin de vérifier cette hypothèse, les auteurs mettent en place une expérience où elles demandent à des étudiants les yeux bandés d'évaluer différentes caractéristiques d'objets. Les résultats obtenus par vidéo permettent aux auteurs de présenter une classification des mouvements en fonction des connaissances recherchées sur les objets.

D'après ces auteurs, les connaissances recherchées sur les objets peuvent porter sur des propriétés de substances (texture, dureté, température et poids), des propriétés de structure (forme, volume et poids) et des propriétés de fonction qui déterminent les articulations, la mobilité et l'utilité de l'objet.

Les mouvements peuvent être divisés en huit procédures d'exploration (*cf.* figure 3.5) :

1. « Le mouvement latéral » (*lateral motion*) correspond à des allers et retours mettant en contact la surface de la peau et une zone plutôt centrale de la surface de l'objet. Cette exploration permet d'appréhender la texture de l'objet.
2. « La pression » (*pressure*) est l'application d'une force sur une partie de l'objet. Cette exploration permet d'évaluer la dureté de l'objet.
3. « Le contact statique » apparaît lors d'un contact prolongé entre la main et l'objet sans que la main ne tienne l'objet ni ne bouge. Cette exploration permet d'appréhender la température.
4. « La tenue sans soutien » (*unsupported holding*) correspond à la simple action de soupeser l'objet. Cette procédure permet l'évaluation du poids de l'objet.

5. « L'enveloppement » (*enclosure*) consiste à obtenir le plus grand contact possible avec l'objet afin de palper les contours de l'objet. Cette exploration permet de percevoir la forme globale et le volume de l'objet.

6. « Le suivi de contour » (*contour following*) consiste en un mouvement calme et non répétitif maintenant un contact avec les contours de l'objet. Cette exploration vise la détermination de la forme exacte de l'objet.

7. « L'évaluation des articulations de l'objet » (*part motion test*) consiste à maintenir une partie fixe tout en appliquant une force à une partie mobile si elle existe.

8. « L'évaluation de la fonction » (*function testing*) est l'exécution des mouvements correspondant aux fonctions de l'objet. Il peut s'agir de presser un bouton déclenchant un automatisme ou d'utiliser un bras de levier par exemple.

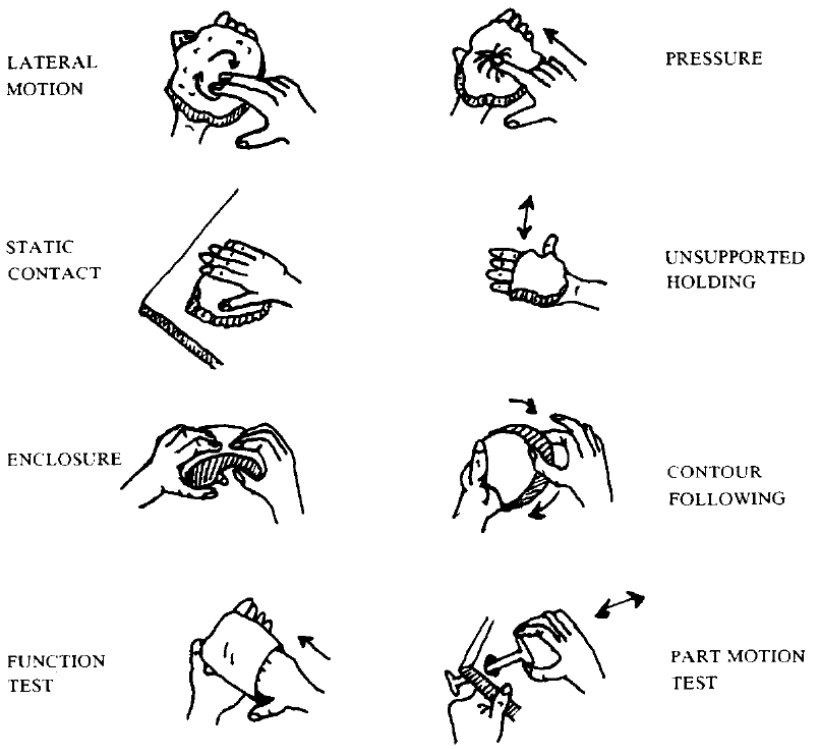


Figure 3.5 – Classification des procédures d'exploration haptique selon Lederman et Klatzky (1987).

Les auteurs concluent que la main, plus qu'un outil de perception, est « intelligente » dans le sens où les mouvements sont en étroite relation avec la recherche d'informations particulières.

3.2.2.2 La complémentarité des procédures d'exploration haptique

Les travaux de Lederman et Klatzky (1987) montrent également que plusieurs procédures peuvent être exécutées de façon complémentaire afin de rechercher et d'appréhender plus globalement les propriétés des objets. Cependant certaines procédures d'exploration ne sont pas compatibles, et ne peuvent donc pas être utilisées simultanément. Par exemple, lorsqu'un sujet cherche à connaître le poids et la forme de l'objet, il est obligé d'exécuter l'une après l'autre les procédures de « tenue sans soutien » et de « suivi de contours » car les mouvements verticaux associés au soupèsement ne permettent pas de longer précisément les arêtes de l'objet et *vice versa*. Cette combinaison successive des procédures, que Lederman et Klatzky (1993) appellent « le principe du repli », entraîne une augmentation du temps d'exploration. A l'inverse, la mise en œuvre simultanée de procédures compatibles permet un gain de temps et favorise la construction d'une représentation unifiée de l'objet. Par exemple, pour évaluer la texture et la dureté, les procédures d'exploration de l'« enveloppement » et du « mouvement latéral » peuvent être utilisées ensemble.

Concernant la complémentarité des procédures d'exploration, Richard *et al.* (2004) soulignent que l'utilisation de procédures successives ou simultanées détermine la qualité plus ou moins globale de la représentation spatiale. Afin de préciser les mécanismes des décisions relatives à l'exécution des procédures d'exploration de l'objet, Russier (2000) reprend le schéma de Klatzky et Lederman (1993) (*cf.* figure 3.6). Ce schéma illustre le principe général de la construction d'une représentation de l'objet par l'association des processus descendant et ascendant. Le processus descendant consiste à choisir des procédures en fonction des propriétés recherchées. Le processus ascendant permet la régulation des procédures en fonction des retours (*feed-back*) de l'action sur l'objet.

Si la modalité haptique permet la mise en œuvre de procédures d'exploration pour l'identification des propriétés des objets, des *patterns* d'exploration relativement moins facilement identifiables permettent l'encodage de configurations spatiales au sein de représentations s'inscrivant dans des référentiels de types égo- et allocentrés. Mais qu'en est-il de l'encodage des informations spatiales inter-objets ?

3.2.3 Conclusion sur l'équipement perceptif non visuel

La modalité auditive présente l'avantage de fournir des informations spatiales à distance. Les aveugles investissent donc largement les informations sonores pour percevoir les azimuts et les distances des objets de l'environnement émettant des sons. Ces informations s'inscrivent naturellement dans un référentiel de type égocentré. Les représentations qui en sont issues se révèlent donc relativement floues. La modalité haptique se limite à la prise d'informations dans l'espace proche. La combinaison des procédures d'exploration haptiques permettent aux aveugles d'identifier les différentes caractéristiques

des objets manipulables.

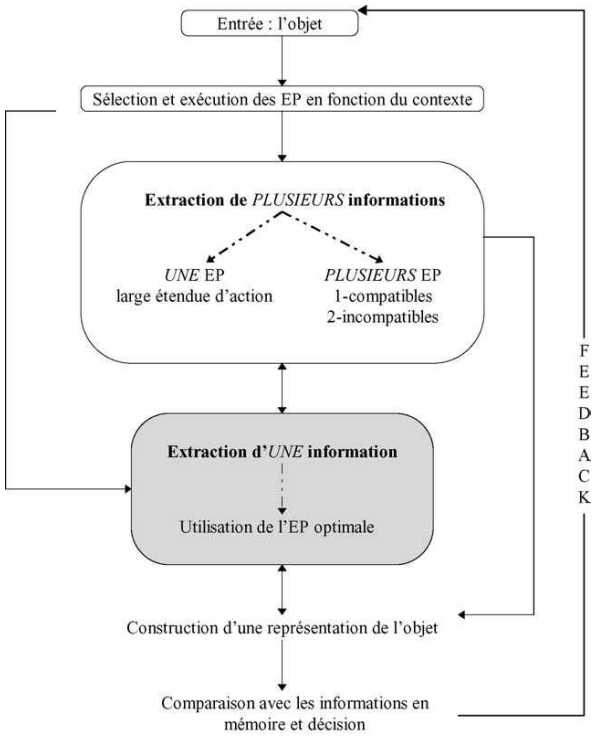


FIGURE 3.6 – D'après Russier (2000), à partir d'un *objet*, l'individu *sélectionne et exécute des procédures d'exploration (EP) en fonction du contexte*. Si le sujet souhaite *extraire plusieurs informations*, il sélectionne *une EP avec une large étendue d'action* ou *plusieurs EP compatibles ou incomplatibles* qui seront donc exécutées simultanément ou successivement. Si le sujet ne recherche qu'*une information*, il sélectionne l'*EP optimale*. Il en résulte une *représentation de l'objet* que le sujet *compare avec les informations en mémoire pour décider* de nouvelles actions. Ainsi les retours (*feed-backs*) sur la comparaison informations-connaissances précisent l'*objet* et permettent le déclenchement de nouvelles EP s'il y a lieu.

3.3 Les stratégies d'exploration et les référentiels

Existe-t-il un parallèle entre les stratégies d'exploration haptique et les stratégies d'exploration locomotrices ?

Ces stratégies d'exploration s'inscrivent-elles dans des structures plus générales ?

Existe-t-il des stratégies plus efficaces que d'autres ?

Quelles sont ces stratégies et dans quel type de référentiel spatial s'inscrivent-elles ?

Finalement comment les stratégies issues des différents types de référentiel se coordonnent-elles ?

3.3.1 La définition des stratégies

Avant que le lecteur n'avance plus loin dans ce chapitre, précisons qu'une « stratégie d'exploration » est « un ensemble de règles fonctionnelles élaborées par le sujet pour résoudre une tâche spatiale » (Hill et Rieser, 1993). Les stratégies sont donc parties intégrantes des intentions du sujet (définir l'orientation d'un objet par rapport à l'autre par exemple). Par ailleurs un « *pattern* d'exploration » est un ensemble de mouvements observables résultants de la mise en œuvre d'une stratégie d'exploration. Ainsi, l'observation des *patterns* d'exploration (mouvements) témoignent des choix stratégiques (intentions) du sujet.

Les sujets aveugles peuvent encoder l'espace par rapport à des indices externes (référentiel allocentré), par rapport à leur propre corps (référentiel égocentré) ou par rapport aux mouvements effectués correspondant à une sorte de référentiel kinesthésique (Millar, 1994). Bien que l'absence de vision entraîne une limitation des indices externes et favorise l'encodage des mouvements dans un référentiel de type égocentré, il ne s'agit que d'une tendance (Ungar *et al.*, 1995a). Ainsi, les voyants peuvent également utiliser des références internes et les aveugles des références externes. L'analyse des mouvements d'exploration permet de caractériser les référentiels dans lesquels se déroule l'encodage spatial de configuration.

3.3.2 Le parallèle entre *patterns* haptique et locomoteur

Différentes études s'interrogent sur l'existence d'un parallèle entre les processus impliqués dans l'encodage de la représentation spatiale au cours de l'exploration haptique et au cours de la locomotion sans vision.

Lors d'une tâche de complétion de triangle, Lederman *et al.* (1987) montrent que les estimations des longueurs des côtés du triangle sont relatives aux mouvements effectués par la main ou par le corps entier. Ainsi, il existerait des similitudes entre les représentations spatiales élaborées par une exploration manuelle ou par un déplacement du corps entier. Pourtant, les tâches de locomotion d'une part, et d'exploration haptique d'autre part, révèlent des différences sur deux plans au minimum. Tout d'abord, elles ne se déroulent pas à la même échelle. Ensuite, alors que le corps de l'individu constitue un point fixe de référence dans le cas de l'exploration haptique, le déplacement du corps entier n'offre pas cette possibilité dans le cas de la locomotion (Wheatheford, 1985). L'exploration haptique paraît donc favoriser la prise de références externes s'inscrivant dans un référentiel de type allocentré, alors que les déplacements du corps entier semblent encourager l'encodage d'une succession de segments les uns par rapport aux autres s'inscrivant donc dans un référentiel de type égocentré.

Cependant, les résultats de l'expérience de Loomis *et al.* (1993) montrent que des personnes aveugles réalisant une complétion de triangle en situation de locomotion n'encodent pas uniquement le

point d'origine et la succession des segments du triangle mais construisent une représentation spatiale du parcours selon une référence extérieure. Reprenant ces travaux, Klatzky (1999) compare les représentations spatiales construites par des sujets non-voyants au cours de tâches de complétion de triangle en situation d'exploration haptique avec celles construites au cours de l'expérience de locomotion de Loomis *et al.* (1993) (*cf.* figure 3.7).

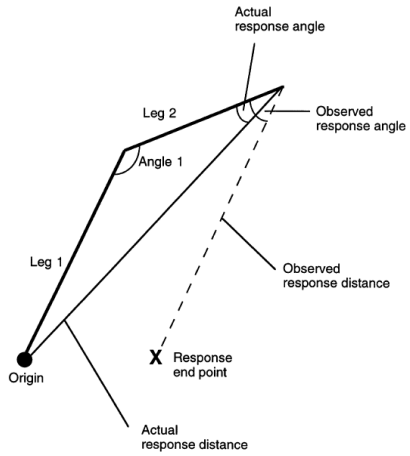


FIGURE 3.7 – Tâche de complétion de triangle (Klatzky, 1999). Le sujet parcourt, avec la main ou le corps entier, le segment 1 (*Leg 1*) puis le segment 2 (*Leg 2*). Il est guidé par un trait en relief en condition haptique et par un expérimentateur en situation de locomotion. Arrivé à la fin du segment 2, le sujet retourne seul à l'origine (*Origin*). Le segment parcouru, à pied ou à la main, caractérise les réponses d'angle (*Observed response angle*), de distance (*Observed response distance*) et de localisation (*Response end point*). Ces réponses sont à comparer avec les bonnes valeurs (*actual response angle, actual response distance, origine*)

Les résultats montrent qu'en l'absence de vison, plus l'espace est grand et plus il est difficile d'en percevoir la globalité. En effet, les performances réalisées dans un espace de manipulation de petite échelle sont meilleures que les résultats obtenus dans un espace de locomotion de grande échelle. Pourtant, l'auteur relève des comportements communs aux deux espaces et conclut que les processus régissant l'encodage non visuel en situation de locomotion et en situation d'exploration haptique sont comparables. Cette idée concorde avec celle des travaux de Gaunet et Thinus-Blanc (1996) sur les stratégies utilisées dans l'espace de locomotion d'une part, et de Gaunet *et al.* (1997) sur les stratégies mises en œuvre dans l'espace de manipulation d'autre part.

En bref, il semble que les *patterns* d'exploration utilisés au cours des mouvements haptiques et ceux mis en œuvre lors de la locomotion puissent chacun être analysés en fonction des référentiels spatiaux dans lesquels ils s'inscrivent.

3.3.3 Les stratégies d'exploration locomotrice

Notons que les mouvements de balayage propres à l'utilisation de la canne blanche sont omniprésents au cours des déplacements des personnes aveugles.

3.3.3.1 Les stratégies de découverte

Les premières stratégies d'exploration locomotrices en situation de cécité sont mises à jour par Hill et Ponder (1976).
→ La stratégie du « périmètre » vise à recueillir des informations sur la forme et la taille de la pièce sans se soucier des objets. Son *pattern* d'exploration consiste à faire le tour de l'espace de travail et revenir au point de départ.
→ La stratégie de la « grille » cherche à découvrir les positions de chaque objet. Son *pattern* consiste à parcourir la pièce d'un côté à l'autre en quadrillant l'espace afin de découvrir les différents objets qui la compose.

Pour Hill et Ponder (1976), ces *patterns* d'exploration témoignent de la mise en œuvre de stratégies de découverte de la configuration. Du point de vue des référentiels spatiaux, Schinazi (2005) suggère que ces stratégies s'inscrivent dans un référentiel de type égocentré. D'après Milner et Goodale (1995), ce dernier est majoritairement utilisé pour les tâches de perception directe et rapide avec l'environnement. Il paraît donc logique que les *patterns* d'exploration des stratégies de découverte s'inscrivent dans un référentiel de type égocentré.

3.3.3.2 Les stratégies d'encodage

Tellevik (1992), Hill et Rieser (1993) et Gaunet et Thinus-Blanc (1996) identifient des *patterns* propres à des stratégies d'encodage où les sujets cherchent à mémoriser une configuration préalablement découverte.

→ La stratégie du « point de référence » consiste à choisir un objet comme repère pour encoder les relations spatiales entre cet objet et les autres (Tellevik, 1992). Ce *pattern* d'exploration locomoteur consiste à réaliser une majorité d'allers et retours entre cet objet et les autres. L'ensemble des déplacements des sujets présente ainsi une forme en étoile. Cette stratégie du « point de référence » se situe donc dans un référentiel de type allocentré dans la mesure où l'objet de repère est indépendant de la position et de l'orientation du sujet. Par ailleurs, les résultats des expériences de Tellevik (1992) confirment ceux de Hill et Ponder (1976) en montrant que les sujets commencent également par utiliser les stratégies de découverte du « périmètre » et de la « grille ».

Hill et Rieser (1993) présentent plusieurs stratégies locomotrices permettant d'encoder des relations spatiales entre différents objets.

→ La stratégie « origine-à-objet » vise à encoder la position des différents éléments depuis la position de départ du sujet. Son *pattern* consiste donc à parcourir différents trajets entre un objet et les autres. Cette stratégie semble se confondre avec la stratégie du « point de référence » identifiée par Tellevik (1992)
→ La stratégie « périmètre-à-objet » cherche à encoder la position des éléments par rapport aux bords de l'espace de locomotion. Son *pattern* d'exploration présente des trajectoires reliant les objets aux zones les plus proches des murs de la pièce.
→ La stratégie « objets-à-objets » vise à encoder les positions des objets les uns par rapport aux autres. Son *pattern* d'exploration consiste à réaliser tous les trajets possibles entre les différents objets.

Du point de vue des référentiels spatiaux, Schinazi (2005) suggère que ces stratégies s'inscrivent dans un référentiel de type allocentré. D'après Milner et Goodale (1995), ce référentiel est majoritairement sollicité au cours des tâches de mémorisation de l'environnement. Il paraît donc logique que les *patterns* d'exploration des stratégies d'encodage s'inscrivent dans un référentiel de type allocentré.

Lors d'une expérience impliquant soixante cinq aveugles dont quarante de naissance, Hill et Rieser (1993) leur demandent d'explorer une pièce d'environ quarante mètres de côté contenant cinq objets. Les sujets doivent ensuite réaliser des estimations de direction entre les différents objets. La mise en relation des *patterns* d'exploration filmés et des performances des sujets montre alors que les meilleurs utilisent les stratégies « objets-à-objets » et « périmètre-à-objet » alors que les moins bons utilisent principalement la stratégie du « périmètre ». Il semble donc que l'association de plusieurs stratégies de type allocentré soit favorable à l'encodage d'une configuration spatiale.

A la suite de ces travaux, Gaunet et Thinus-Blanc (1996) cherchent également à identifier des relations entre les *patterns* d'exploration et les performances dans un espace de locomotion. Les auteurs demandent alors à des adultes aveugles de naissance, des non-voyants tardifs et des voyants les yeux bandés d'explorer des configurations spatiales composées de quatre objets dans un espace de cinq mètres de côté. Les expérimentateurs demandent ensuite aux sujets de reconnaître parmi différentes configurations si les objets ont été déplacés ou non. Cette tâche est appelée « réaction à un changement spatial ». Deux stratégies d'exploration haptiques sont identifiées.
→ La stratégie des « allers et retours » vise à encoder les positions des objets les uns par rapport aux autres (*cf.* figure 3.8 a.). Son *pattern* d'exploration comporte au moins trois mouvements consécutifs de va-et-vient entre deux objets. Cette stratégie repose sur des indices externes et s'inscrit dans un référentiel de type allocentré.
→ La stratégie « cyclique » consiste à encoder les mouvements de la main effectuant le tour des objets (*cf.* figure 3.8b.). Son *pattern* présente des mouvements partant d'un objet et y revenant après la visite des trois autres objets. Reposant sur des indices internes, cette stratégie s'inscrit dans un référentiel de type égocentré.

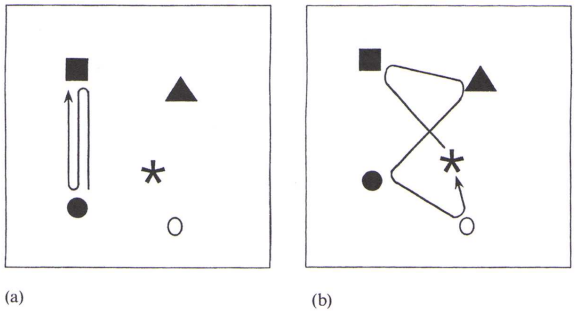


Figure 3.8 – Exemples de stratégies d'exploration haptiques observées par Gaunet *et al.* (1997). La figure a) représente la stratégie des « allers et retours » et la figure b) la stratégie « cyclique ».

Les résultats montrent une importante corrélation entre les *patterns* d'exploration recueillies et les performances spatiales. En effet, les sujets adoptant principalement la stratégie *cyclique* présentent des performances moins élevées que ceux utilisant majoritairement la stratégie des allers et retours. Du point de vue des référentiels spatiaux, les auteurs soulignent les similitudes entre ces résultats et ceux de l'expérience de Hill et Rieser (1993). En effet, les sujets utilisant des stratégies d'exploration de type allocentré (« objets-à-objets », « périmètre-à-objets » et « allers et retours ») réalisent de meilleures performances spatiales que ceux utilisant des stratégies d'exploration de type égocentré (« périmètre » et « cyclique »).

En bref, il semble que les stratégies d'exploration locomotrices de type allocentré permettent un encodage des éléments de l'espace plus efficace que celles de type égocentré qui semblent plus adaptées à la découverte de configurations.

3.3.4 Les stratégies d'exploration haptiques

Différentes études s'intéressent aux stratégies haptiques utilisées par des sujets aveugles sous l'angle des référentiels spatiaux.

Millar (1979) demande à des enfants aveugles de naissance d'explorer une configuration en relief de quatre objets puis de la reproduire depuis la même position (condition alignée) ou après avoir effectué un déplacement autour de la table (condition non alignée). Les résultats sont meilleurs en condition alignée. De la même manière, Hollins et Kelley (1988) demandent à des sujets non-voyants d'apprendre une configuration de cinq objets. Ensuite les sujets doivent estimer les directions des différents objets depuis leur position initiale (condition alignée), ou depuis une position nouvelle (condition non alignée). Les résultats sont comparables à ceux de l'expérience de Millar (1979). Les auteurs en concluent que si les sujets aveugles sont gênés par leur déplacement, cela signifie qu'ils encodent la position des objets par rapport à la position de leur propre corps et non en fonction de repères externes. Ils utilisent alors

principalement des stratégies d'exploration haptiques de type égocentré. Cependant, aucune de ces deux études ne révèlent les *patterns* d'exploration mis en œuvre.

Afin d'analyser les différentes stratégies d'exploration haptiques, Ungar *et al.* (1995a) réalisent le même type d'expérience en filmant tous les mouvements des sujets. Au cours de cette tâche, des enfants aveugles doivent explorer des configurations de cinq objets dans une boîte ronde de trente quatre centimètres de diamètre avant de la reproduire sur le couvercle de la boîte refermée. Les expérimentateurs mesurent les erreurs de positionnement des objets. A nouveau, les résultats sont meilleurs en condition alignée qu'en condition non alignée. L'analyse des *patterns* d'exploration révèle l'existence de trois stratégies différentes.

→ La stratégie du « bord » consiste à encoder les positions des objets par rapport aux bords de l'espace de manipulation sans se soucier des positions relatives des objets entre eux. Son *pattern* d'exploration présente des trajectoires reliant les objets aux bords. Cette stratégie d'exploration haptique est équivalente à celle du « périmètre-à-objet » dans l'espace de locomotion et s'inscrit donc dans un référentiel de type allocentré.

→ La stratégie « relative » vise à encoder les positions des objets les uns par rapport aux autres sans se soucier des bords de l'espace de manipulation. Son *pattern* d'exploration présente des trajectoires reliant les objets entre eux. Cette stratégie ressemble tout particulièrement à la stratégie « objets-à-objets » de l'espace de manipulation et s'inscrit donc dans un référentiel de type allocentré.

→ La stratégie du « pointage » consiste à encoder les mouvements de la main effectuant le tour des objets. Son *pattern* d'exploration est constitué de trajectoires répétées reliant les objets toujours dans le même sens. Elle est similaire à la stratégie « cyclique » de l'espace de locomotion et s'inscrit donc dans un référentiel de type égocentré.

Ungar *et al.* (1995a) mettent en relation les performances des sujets et les stratégies employées (*cf.* tableau 3.1).

Stratégies →	relative	bord	pointage	bord et relative
condition alignée	3,48	5,78	5,85	3,42
condition non alignée	8,13	11,06	10,35	4,98

Tableau 3.1 – Moyennes d'erreur (en cm) par condition en fonction des stratégies d'exploration.

Il apparaît alors que les sujets les moins performants emploient la stratégie du « bord » ou celle du « pointage ». A l'inverse, les sujets les plus performants utilisent la stratégie « relative ». Par ailleurs, au cours d'une analyse plus approfondie, les auteurs découvrent que plusieurs sujets présentent des *patterns* d'exploration se rapportant à la fois à la stratégie du « bord » et à la stratégie « relative ».

Ce groupe de sujets réalisent des performances nettement supérieures aux autres groupes. En résumé, il semble que la recherche d'indices externes favorise l'élaboration de la représentation spatiale d'une configuration lors d'une exploration haptique. Constatant l'impact des stratégies employées, les auteurs soulignent les intérêts potentiels d'enseigner aux sujets les moins performants l'utilisation des stratégies de recherche d'indices externes.

Cette perspective est également proposée par Gaunet *et al.* (1997). En effet, à la suite de leur étude de « réaction au changement spatial » se déroulant dans un espace de locomotion (Gaunet et Thinus-Blanc, 1996) (*cf.* §3.3.3.2 p.92), les auteurs réitèrent une expérience comparable dans un espace de manipulation d'un mètre de côté comportant cinq objets. Cependant, la tâche de détection des changements comporte trois situations. La première demande aux sujets d'annoncer s'il y a eu un changement dans la configuration en condition alignée (*cf.* figure 3.9.CP1). La seconde se déroule en condition non alignée, c'est-à-dire après un déplacement du sujet du côté opposé à la configuration (*cf.* figure 3.9.CP2). La troisième se tient également en condition non alignée mais après une rotation de la configuration de cent quatre vingt degrés (*cf.* figure 3.9.CP3).

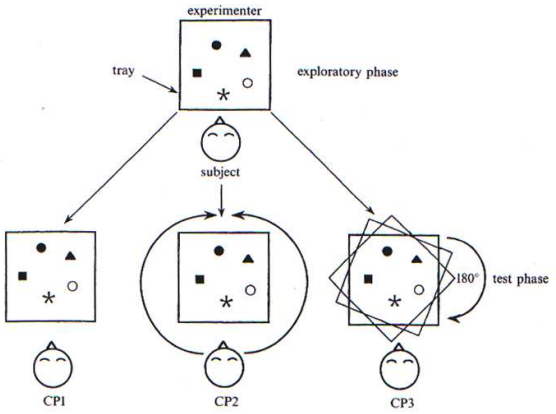


Figure 3.9 – La phase exploratoire et les trois conditions de détection de changement spatial (Gaunet *et al.*, 1997). En condition CP1 le sujet est aligné avec la configuration d'exploration. En condition CP2 le sujet fait le tour de la configuration. En condition CP3 la configuration est tournée à cent quatre vingt degrés.

Dans un premier résultat, les auteurs identifient les stratégies d'exploration haptiques des « allers et retours » et « cycliques » de la même manière que dans l'espace de locomotion. Ensuite la même corrélation entre les stratégies et les performances apparaît. Les conditions non alignées sollicitant une représentation allocentrée, il semble que la supériorité des stratégies de type allocentré renforce les représentations de même nature.

Stratégies	Descriptions	Illustrations	Référentiels
« **Périmètre** » (*perimeter*) (Hill et Rieser, 1993)	Exploration des limites d'une aire pour identifier la forme, la taille et les caractéristiques du périmètre.		Egocentré
« **Grille** » (*grid*) (Hill et Rieser, 1993)	Recherche des éléments internes d'une configuration en quadrillant l'aire d'exploration.		Egocentré
« **Cyclique** » (*cyclic*) (Gaunet et Thinus-Blanc, 1996)	Déplacement d'un objet à l'autre dans l'ordre et en revenant au point de départ.		Egocentré
« **Périmètre-à-objets** » (*perimeter-to-object*) (Hill et Rieser, 1993)	Déplacement suivant tous les trajets possibles afin de percevoir la configuration.		Allocentré
« **Allers et retours** » (*Back-and-forth*) (Gaunet et Thinus-Blanc, 1996)	Déplacement de façon répétée entre deux objets.		Allocentré
« **Objets-à-objets** » (*objetc-to-object*) (Hill et Rieser, 1993)	Déplacement de façon répétée d'un objet à l'autre afin de percevoir la configuration.		Allocentré
« **Point de référence** » (*Reference Point*) (Tellevik, 1992)	Déplacement depuis un élément particulier vers les autres en forme d'étoile.		Allocentré

Tableau 3.2 – Stratégies d'exploration mises à jour par les études de Tellevik (1992), Hill et Rieser (1993) Gaunet et Thinus-Blanc (1996) et Gaunet *et al.* (1997) et leurs référentiels spatiaux respectifs.

Finalement, il semble que les sujets utilisant des stratégies de type égocentré au début de l'expérience progressent au fur et à mesure des essais et modifient certainement leurs stratégies. Ainsi, les auteurs suggèrent qu'un apprentissage des stratégies adéquates pourrait pallier le déficit de représentation de type allocentré de certains sujets. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par Barber et Lederman (1988) au cours d'une tâche de complétion de triangle et par Postma *et al.*

(2007) au cours d'une tâche de reproduction de configuration spatiale. Il semble donc que la qualité de l'encodage spatial haptique soit influencée par le type de référentiel spatial dans lequel s'inscrivent les mouvements d'exploration (*cf.* tableau 3.2).

3.3.5 La coordination des référentiels spatiaux en l'absence de vision

Thinus-Blanc et Gaunet (1997) proposent un modèle expliquant les mécanismes du traitement de l'information spatiale en fonction des référentiels spatiaux de type égo- et allocentré. Ainsi, les cartes cognitives guident les activités d'investigation de l'espace des individus. Par conséquent, leurs stratégies d'exploration reflètent leurs représentations internes. Les *patterns* d'exploration seraient donc un moyen privilégié pour la compréhension des processus mentaux construits par les individus non-voyants. Thinus-Blanc et Gaunet (1997) distinguent le « *schéma* » d'une part, et la « *carte spécifique* » d'autre part. Alors que le premier est un système abstrait de règles permettant l'organisation de toutes sortes de connaissances spatiales, la seconde correspond à une représentation de l'environnement. Ainsi, les règles générales issues du schéma permettent l'encodage d'une carte spécifique. Ces règles concernent des relations spatiales s'inscrivant dans un référentiel de type allocentré et consistent en la sélection de points remarquables opportuns ou encore en la définition d'une direction cardinale telle que « le fort se trouve dans le nord-ouest de la plage » par exemple. Cependant, les auteurs insistent sur le fait que toute action spatiale est exécutée par rapport au corps propre. Ainsi, des « *règles d'encodage simples* » permettent la construction de « mémoires spatiales spécifiques » dirigeant directement les actions spatiales du corps dans l'espace. Ces règles simples s'inscrivent dans un référentiel spatial égocentré et permettent l'élaboration de routes comme « prendre à droite après la plage pour atteindre le fort » par exemple. Thinus-Blanc et Gaunet (1997) proposent donc un modèle de construction de la représentation spatiale impliquant une coordination des référentiels de type égo- et allocentrés. Selon ce modèle, les représentations de type carte sont basées sur les règles générales et allocentrées des schémas alors que les représentations de type route sont encodées à partir de règles d'encodage égocentrées et spécifiques issues des mémoires spatiales spécifiques. D'après ces auteurs, au cours de l'acquisition et de l'utilisation des informations spatiales, les individus modifient leurs cartes et leurs routes pour s'adapter à la situation. Ainsi, au fur et à mesure de l'expérience, ces modifications entraînent l'évolution des règles générales et spécifiques. Ce processus spatial interne est déduit à partir des comportements observables comme illustré sur la figure 3.10 ci-dessous.

Finalement, ce modèle de Thinus-Blanc et Gaunet (1997) semble montrer que les représentations spatiales générales et spécifiques modifient les stratégies d'exploration haptique et de locomotion, et *vice versa*. Nous retrouvons là l'effet des processus ascendants et descendants. Les premiers favorisent

l'assimilation de l'environnement et les second l'accomodation des représentations de type carte. Ici, les cartes géographiques, en tant qu'outil psychologique peuvent accélérer la structuration de ces représentations par le moyen de transmissions sociales et culturelles (Vygotsky, 1930). Ainsi, la manipulation de cartes en relief devrait donc faciliter la mise en œuvre de stratégies de type allocentré. Le modèle de Thinus-Blanc et Gaunet (1997) implique deux perspectives. Dans un premier temps, il souligne l'importance des stratégies haptiques au cours de l'exploration de cartes en relief. Ces dernières permettent ainsi la construction de cartes cognitives spatiales pour la locomotion en situation de cécité. Dans un second temps, il suggère également que les stratégies de locomotion pourraient influencer les représentations spatiales de l'environnement. Ces interrogations renvoient directement aux expériences géographiques associant les cartes en relief et les déplacements dans l'environnement en situation de cécité.

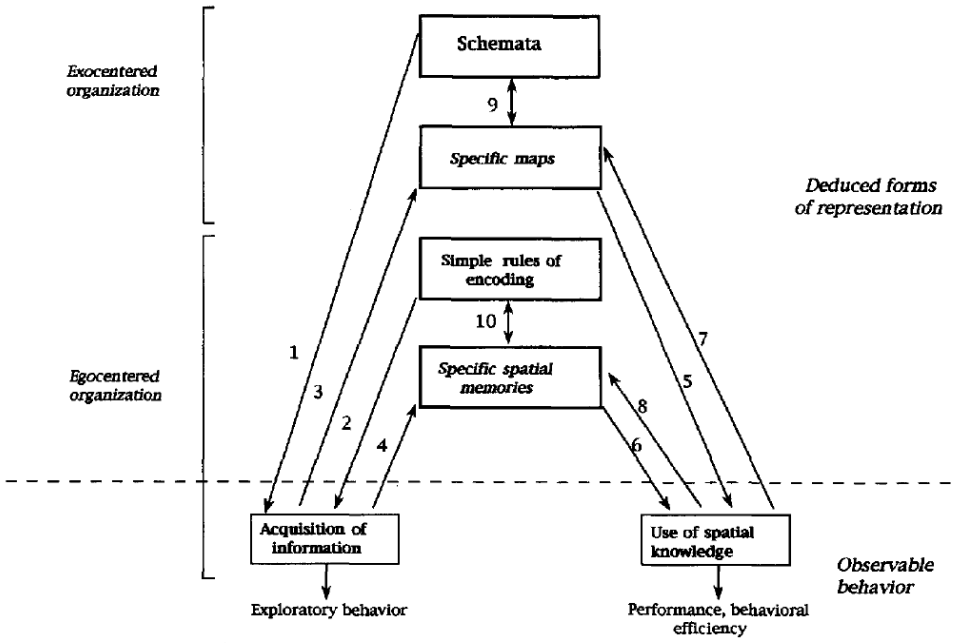


FIGURE 3.10 – Différentes formes de représentations spatiales internes déduites (*Deduced forms of representation*) à partir des comportements observables (*Observable behavior*) (Thinus-Blanc et Gaunet, 1997). Représentations et comportements sont séparés par la ligne horizontale en pointillée. Seuls les schémas (*schemata*) et les représentations de type carte (*Specific maps*) s'inscrivent dans un référentiel allocentré (*Exocentered organization*). A l'inverse, les règles d'encodage (*Simple rules of encoding*), les représentations de type route (*Specific spatial memories*) et les comportements (*Exploratory behavior*) s'inscrivent dans le référentiel égocentré (*Egocentered organization*). Au cours de la réalisation de la tâche les sujets utilisent leurs schémas (*flèche 1*) et règles (*flèche 2*) pour acquérir des informations (*acquisition of information*) sur l'espace au moyen des stratégies correspondantes (*exploratory behavior*). Les informations recueillies permettent la construction de représentations de type carte (*flèche 3*) et/ou route (*flèche 4*). Ces représentations déterminent les connaissances spatiales utilisées (*Use of spatial knowledge*) (*flèches 5 et 6*) pour diriger l'exécution des actions (*Performance, behavioral efficiency*). Au fur et à mesure du déroulement de l'action, les retours qu'obtiennent les sujets modifient leurs représentations (*flèches 7 et 8*). Ces modifications entraînent l'évolution des schémas et des règles d'encodage (*flèches 9 et 10*) responsables des stratégies d'exploration.

3.3.6 Conclusion sur les stratégies d'exploration et les référentiels

Les stratégies d'exploration haptique reposent donc sur l'encodage des mouvements de la main. Ainsi, les *patterns* observés témoignent de la volonté des sujets d'encoder une représentation spatiale de types égo- ou allocentrés. Le parallèle établi entre les stratégies d'exploration haptique et locomotrice

suggère que ces deux types d'exploration sollicitent des processus cognitifs similaires. Les trajets du corps entier ou de la main semble permettre donc l'élaboration de représentations spatiales s'inscrivant dans l'un ou l'autre des référentiels en fonction de la stratégie employée. La coordination de ces types de représentations en situation de cécité s'articule autour des schémas spatiaux issus du développement, des règles d'encodages et des représentations spatiales de type route ou carte dont les sujets ont besoin. Finalement, si les activités d'exploration haptique d'un espace de manipulation et locomotrice d'un espace de navigation entraînent des raisonnements communs, les cartes géographiques présentent un potentiel particulièrement important pour l'élaboration de connaissances spatiales non visuelles.

3.4 L'utilisation des cartes en relief

Quels sont les intérêts de l'utilisation de cartes en relief pour les aveugles ?

Quels facteurs influencent l'efficacité d'une carte en relief ?

L'exploration d'une carte en relief peut-elle se substituer au déplacement du corps entier pour l'acquisition de connaissances spatiales sur un espace de navigation ?

3.4.1 Les cartes en relief

Pour Hatwell et Martinez-Sarocchi (2000) « les cartes sont des représentations symboliques bidimensionnelles projectives, de taille réduite, d'un espace réel » (p.269). Ainsi, elles rendent accessible ce qui ne l'est pas. Une carte en relief est pensée et conçue pour être lue par le sens du toucher, nécessitant ainsi que des portions soient élevées dans la troisième dimension (Walter et Robinson, 1983).

3.4.1.1 La conception des cartes en relief

Une difficulté inhérente à la conception et l'utilisation des cartes en relief provient de la faiblesse de la discrimination tactile par rapport à la discrimination visuelle. D'après Golledge (1991) les cartes en relief doivent présenter le moins de détails possible pour ne pas encombrer la perception haptique, mais suffisamment pour permettre aux personnes aveugles de comprendre et apprendre l'espace avant de naviguer dans l'environnement. Ainsi les indications en braille, dont une lettre mesure de six à sept millimètres de hauteur et de trois à quatre de largeur, ne peuvent être nombreuses et limitent la désignation de points remarquables. Il s'agit donc de fournir aux individus non-voyants une représentation épurée de l'espace global afin qu'il soit perceptible au toucher tout en indiquant des points remarquables dont on a vu qu'ils étaient indispensables à la navigation. Finalement, la qualité d'une carte en relief dépend du compromis entre la clarté de la représentation et du choix des points remarquables.

Lors d'études sur les préférences cartographiques des personnes aveugles, les réponses aux questionnaires de Rowell et Ungar (2003a,b) montrent que les cartes plastiques déformées et les cartes thermoformées (papier dont les microcapsules gonflent en fonction du dessin réalisé par le transcripteur) sont les plus utilisées par les personnes déficientes visuelles. Par ailleurs, les formats A3 et A4 sont également les plus répandus. Plus récemment, Jehoel *et al.* (2006) soulignent que l'équipe TIMP (*Tactile Inkjet Mapping Project*) de Cambridge (U.K.) vise à mettre au point la conception industrielle de nouvelles cartes en relief plus précisément adaptées aux besoins des utilisateurs grâce à une nouvelle technologie utilisant la superposition de nombreux jets d'encre successifs. En effet, par rapport à l'imprimante en relief actuelle *TIGER* qui déforme le papier, les cartes issues du projet TIMP seraient en mesure de produire un grand nombre de textures différentes avec une précision plus importante.

3.4.1.2 Le potentiel des cartes en relief

Le principal problème des personnes privées de la vue consiste à encoder des indices environnementaux dans un cadre de référence externe (Millar, 1990). Les cartes en relief se révèlent être une solution pour présenter ces indices extérieurs dans un espace de manipulation non visuel (Kennedy *et al.*, 1992).

D'après (Ungar *et al.*, 1997), les cartes en relief contribuent à l'élaboration des cartes cognitives spatiales des personnes déficientes visuelles de différentes manières. Tout d'abord, elles ont le potentiel de fournir des informations géographiques sur les lieux distants qui ne peuvent être expérimentés directement, ensuite elles peuvent offrir des représentations globales des environnements familiers locaux. Les cartes en relief sont donc une source d'informations vicariantes conservant les distances entre les éléments (Ungar *et al.*, 1994). De plus, explorer une carte avec les deux mains offre une relative simultanéité de perception améliorant la globalité de la représentation spatiale.

Par ailleurs, Jacobson (1999) rappelle que les cartes en relief sont nécessairement explorées de façon séquentielle par les personnes aveugles et sollicitent donc fortement la mémoire. Thinus-Blanc et Gaunet (1997) nuancent cette idée en soulignant que l'exploration haptique se déroule dans un espace à petite échelle et implique une charge cognitive moins lourde que lors de déplacements dans l'environnement naturel.

Quoi qu'il en en soit, les sujets doivent se situer sur la carte pour pouvoir l'utiliser a des fins de navigation dans l'espace. A ce propos, Hatwell et Martinez-Sarocchi (2000) précisent qu'après avoir repérer leur position sur la carte, les utilisateurs doivent encore localiser le but à atteindre, extraire les informations pertinentes en distance et en direction, et conserver ces informations en mémoire. De plus, les processus cognitifs sollicités doivent être adaptés à l'« alignement » de la carte. En effet, une carte est dite « alignée » si le haut correspond à la direction droit devant, « contre-alignée » dans le cas d'une rotation de cent quatre vingt degrés, c'est-dire lorsque toutes les directions sont opposées entre le référentiel de la carte et celui du sujet, ou encore « non-alignée » lorsque l'écart entre les

orientations du sujet et de la carte sont autres que zéro ou cent quatre vingt degrés. Ainsi, l'utilisation de cartes en relief « nécessite de solides compétences spatiales et la mise en œuvre de systèmes de référence stables basés sur des indices extérieurs » (p.269) (Hatwell et Martinez-Sarocchi, 2000).

En résumé, les cartes en relief jouent un rôle particulièrement important pour la navigation spatiale en l'absence de vision.

3.4.2 Des cartes en relief aux navigations

Dans une étude princeps, Thorndyke et Hayes-Roth (1982) comparent les connaissances spatiales construites par les personnes voyantes au moyen d'une carte ou d'un déplacement (expérience directe). Les résultats montrent que les cartes sont plus efficaces pour l'apprentissage des relations entre les différents éléments de l'environnement dans un référentiel de type allocentré, alors que la navigation par expérience directe est supérieure pour s'orienter dans l'espace et estimer la longueur des routes dans un référentiel de type égocentré. Ces auteurs soulignent l'intérêt des cartes pour la construction de représentations spatiales chez les sujets voyants. Les études portant sur la construction de représentations spatiales et sur la navigation des aveugles témoignent de la mise en œuvre de mécanismes similaires impliquant la concomitance de processus ascendant et descendant.

3.4.2.1 Les premiers témoignages de réciprocité

Parmi les précurseurs des études proposant aux personnes aveugles d'utiliser des cartes en relief, Leonard et Newman (1967) demandent à des adolescents aveugles de suivre un expérimentateur à travers les rues du voisinage avant d'identifier le trajet parcouru sur une carte. Les résultats montrent que les sujets retrouvent les routes qu'ils ont empruntées sur la carte en relief sans aucun apprentissage préalable. Ils sont également en mesure de proposer de nouveaux raccourcis qu'ils n'ont pas empruntés. Ainsi, les aveugles semblent capables de reconstruire une représentation de type carte, s'inscrivant dans un référentiel de type allocentré, à partir de l'exploration directe de l'environnement, s'inscrivant dans un référentiel de type égocentré.

Par la suite, Bentzen (1972) demande à six sujets non-voyants congénitaux et accidentels de réaliser un itinéraire dans un campus inconnu en utilisant la carte représentant le parcours. Les résultats montrent que les sujets parviennent globalement à accomplir l'itinéraire. La réciproque à l'expérience de Leonard et Newman (1967) paraît donc vérifiée. Ainsi, les aveugles semblent parvenir à se repérer dans un espace de navigation, s'inscrivant dans un référentiel de type égocentré, à partir d'informations provenant d'une carte en relief, s'inscrivant dans un référentiel de type allocentré.

S'inscrivant dans la théorie de la *Différence*, ces expériences n'excluent pas que différents facteurs tels que l'expérience visuelle, la taille de l'espace ou encore la nature des points remarquables puissent

influencer les performances spatiales des aveugles comme nous allons le constater au cours des études suivantes.

3.4.2.2 L'expérience visuelle et les cartes en relief

Casey (1978) demande à vingt adolescents, dix aveugles de naissance et dix mal-voyants, de réaliser une maquette de leur établissement scolaire en utilisant vingt-deux pièces de construction constituées de blocs de bois pour les bâtiments et de bandes adhésives pour les routes. Bien que les sujets aveugles de naissance soient en mesure de construire des représentations précises de l'espace, ces dernières restent moins précises que celles des sujets mal-voyants.

Lors d'expériences similaires, Hudson (1984) et Ochaita et Huertas (1993) obtiennent des résultats concordants. En effet, les constructions spatiales des aveugles congénitaux sont légèrement moins précises que celles des aveugles accidentels. Ces auteurs précisent tout de même que ces résultats correspondent à des tâches impliquant des routes simples. Par ailleurs, Foulke (1982) souligne d'importantes différences entre les aveugles de naissance et les aveugles tardifs dans le cas de configurations plus complexes.

Ultérieurement, Ungar *et al.* (1995b) réalisent une expérience d'exploration cartographique avec des enfants aveugles, mal-voyants et voyants. La tâche consiste à apprendre une carte en relief avant de la reconstruire de toutes pièces (*cf.* figure 3.11). Les auteurs mesurent les écarts de positionnement des différents éléments. Les principaux résultats montrent qu'il n'existe pas de différence entre les données issues des sujets aveugles et des sujets mal-voyants. Par contre, les sujets voyants sont plus précis. La figure 3.11 montre malgré tout que les reconstructions des personnes non-voyantes (carte C) peuvent égaler le niveau de précision des personnes voyantes (carte B). En définitive, les personnes non- et mal-voyantes produisent les représentations les moins précises (cartes C et D). Ungar *et al.* (1995b) relèvent que les voyants utilisent plutôt des stratégies encodant les positions des éléments les uns par rapport aux autres ou par rapport aux bords de la carte alors que les personnes non- et mal- voyantes tendent à apprendre les formes des éléments et à encoder leurs positions par rapport à leur propre corps. Ainsi, les personnes souffrant de déficits visuels semblent plus orientées vers des stratégies de type égocentré et spécifiques que vers des stratégies de type allocentré et générales. Cependant, les auteurs notent que les sujets non-voyants qui réussissent le mieux utilisent des stratégies allocentrées. Ainsi, les stratégies paraissent jouer un rôle plus important que l'absence d'expérience visuelle. Ces résultats confirment la nécessité d'explorer les cartes en relief selon une stratégie de type allocentré en situation de cécité.

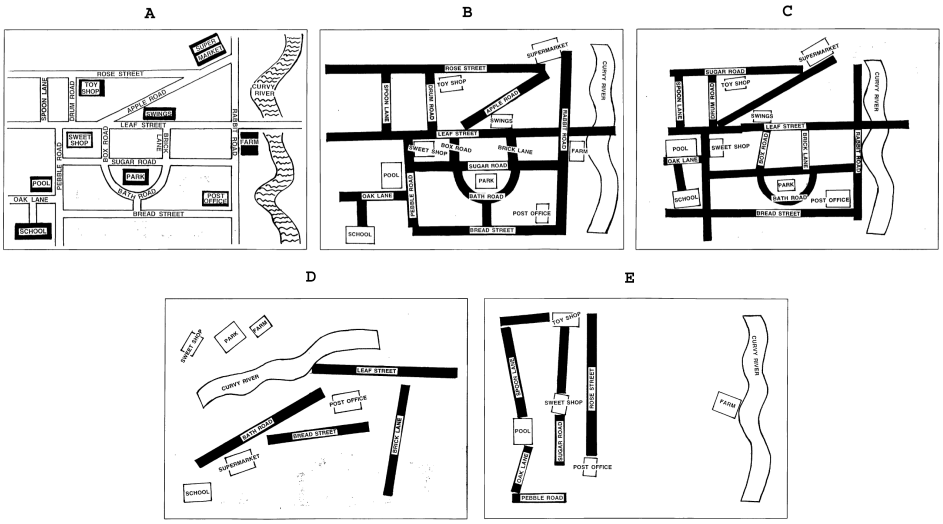


FIGURE 3.11 – Cartes issues de l'expérience de Ungar *et al.* (1995b). A la suite de l'apprentissage d'une carte annotée (A), les sujets reconstruisent la carte avec du matériel de maquette également annoté (blocs et bandes). La carte (B) représente une construction précise d'un sujet voyant alors que la carte (C) correspond à une représentation précise d'un sujet aveugle. La carte (D) illustre une construction imprécise d'un sujet non-voyant et la carte (E) celle d'un sujet mal-voyant.

En résumé, il semble que les sujets non-voyants aient le potentiel de faire les liens réciproques entre la carte, espace allocentré de taille réduite, et l'environnement naturel, espace égocentré de grande échelle. Cependant, il reste difficile de savoir si certaines moins bonnes réponses des aveugles de naissance sont dues à l'absence d'expérience visuelle ou à l'utilisation de stratégies d'exploration moins efficaces lorsque la configuration est complexe.

3.4.2.3 Les cartes et l'encodage de configurations simples

Lorsque Herman *et al.* (1983) demandent à douze adolescents aveugles d'explorer une carte en relief représentant la configuration spatiale de quatre éléments disposés dans un gymnase, les sujets se déplacent dans cet espace de grande échelle et localisent les différents éléments de la configuration avec un degré de précision tout à fait correct. Ici les cartes en relief paraissent efficaces pour des configurations simples.

Par ailleurs, Landau (1986) demande à une aveugle de naissance de quatre ans d'utiliser une carte en relief sans apprentissage préalable pour atteindre un élément dans un espace restreint. Cette carte comporte seulement deux symboles en relief, la position du sujet et celle de l'élément à atteindre. Outre la capacité du sujet à se repérer dans l'espace, les résultats révèlent une absence de différences avec les performances d'un autre sujet voyant du même âge. L'auteur avance qu'un aveugle de naissance est rapidement en mesure d'utiliser une carte en relief et les concepts spatiaux qui y sont associés.

Cependant Morrongiello *et al.* (1995) soulignent que la présence d'un seul sujet nécessite d'émettre des réserves quand aux conclusions de ces travaux.

De leur côté, Ungar *et al.* (1994) réalisent des expériences visant à vérifier si les cartes en relief sont utiles aux individus non-voyants pour se représenter une configuration de cinq éléments dans une pièce. Vingt trois enfants déficients visuels se livrent à la première expérience. Huit sont aveugles et quinze sont mal-voyants. Deux groupes sont constitués. La tâche consiste à estimer depuis la porte d'entrée les directions des cinq éléments se trouvant dans une pièce. Les sujets les explorent au moyen d'un déplacement dans la salle (condition *sans carte*), ou au moyen une carte en relief (condition *avec carte*). Les résultats montrent que les sujets non-voyants sont moins performants que les sujets mal-voyants à la suite de l'exploration (50° d'erreur angulaire contre 19°). A la suite de la consultation de la carte, les différences s'amenuisent (35° d'erreur angulaire contre 20°). Afin de mesurer l'influence de la consultation de la carte sur l'exploration, les auteurs demandent aux sujets de réaliser une nouvelle exploration après les estimations faisant suite à la consultation de la carte. Les différences entre les deux groupes diminuent encore (29° d'erreur angulaire contre 21°). Ainsi, au cours de cette expérience, il semble que les sujets aveugles exploitent mieux les cartes que les sujets mal-voyants.

A la suite de cette expérience Ungar *et al.* (1994) en réalisent une seconde avec un plus grand nombre de sujets. Ici la tâche consiste à explorer les six éléments d'une salle depuis un point central. Chaque sujet se livre à une condition où il se déplace dans la pièce (condition *sans carte*) et une condition où il utilise une carte en relief (condition *avec carte*). L'ordre contrebalance les effets d'apprentissage. Les expérimentateurs demandent ensuite aux sujets d'estimer les directions des autres points depuis des emplacements différents. Les résultats issus de cette expérience concordent avec ceux de Herman *et al.* (1983) et confirment l'hypothèse selon laquelle les sujets rencontrant le plus de difficultés à construire une représentation de l'espace au cours de l'exploration sont ceux qui tirent le plus de profit des cartes. Autrement dit, les cartes semblent particulièrement utiles aux aveugles pour l'apprentissage de cette configuration simple.

En résumé, les études de Landau (1986), d'Herman *et al.* (1983) et Ungar *et al.* (1994) montrent que des sujets non-voyants tirent profit d'une carte pour des tâches d'estimation ou de locomotion dans un espace restreint comportant un nombre limité d'éléments.

3.4.2.4 Les cartes et l'encodage des configurations complexes

Au cours d'une expérience, Spencer et Travis (1985) demandent à six sujets aveugles d'apprendre un espace urbain avec ou sans l'aide d'une carte en relief. Au cours de cette tâche d'apprentissage, les sujets se déplacent guidés par un expérimentateur qui commente l'environnement de la même manière en condition *avec carte* ou *sans carte*. Les auteurs mesurent les temps nécessaires pour la réalisation des parcours, et la précision des réponses à des questions de type route (égocentrées) et de type

carte (allocentré). D'un point de vue quantitatif, aucune différence significative n'apparaît entre les conditions *avec carte* et *sans carte*. Les auteurs expliquent ce résultat du fait des fortes compétences en mobilité des sujets de l'échantillon. Cependant, d'un point de vue qualitatif, les sujets déclarent préférer disposer de la carte afin de pouvoir explorer l'environnement de façon autonome.

S'intéressant également aux environnements complexes, Jacobson (1998) montre les capacités des aveugles à utiliser des cartes en relief dans ce contexte. Lors d'une première expérience, l'auteur demande à trois aveugles de naissance de dessiner la carte de leur université. Les erreurs d'orientation des lignes peuvent aller jusqu'à quatre-vingt dix degrés. Ensuite l'auteur fournit aux sujets une carte en relief exacte de l'université. Une semaine plus tard, les étudiants se livrent au même exercice. Les représentations sont significativement meilleures. Dans une seconde expérience, l'auteur demande à trois sujets non-voyants d'explorer une carte en relief comportant dix villes et le trait de côte de leur pays (Pays de Galles, Grande Bretagne) pendant cinq minutes. La carte est ensuite retirée. Bien que les sujets estiment rencontrer des difficultés dans l'estimation des distances entre les villes, les résultats révèlent que deux sujets sur trois réalisent de bonnes performances. Les tâches de remplissage de « cartes à trou » et de reconnaissance de la carte correcte parmi trois propositions (rotation de 120° et 240°) sont réussies. L'auteur en conclut que les sujets aveugles peuvent construire des représentations spatiales globales des environnements complexes à partir de cartes en relief.

3.4.2.5 Les points de repère pour le positionnement sur la carte

Pour Ungar et Blades (1996), la condition primordiale pour l'utilisation d'une carte géographique est la capacité du sujet à se localiser et à actualiser sa position sur celle-ci afin de pouvoir extraire les informations de distance et de direction des points remarquables pertinents. En milieu naturel, si les voyants peuvent percevoir différents points remarquables simultanément (Peruch *et al.*, 1986), les non-voyants sont contraints de les appréhender successivement et procèdent donc de façon différente. Ungar et Blades (1996) soulignent qu'il existe une différence importante entre les points remarquables uniques, bien distincts les uns des autres, et les points remarquables multiples, tous identiques. Ainsi, alors que les relèvements de deux points remarquables uniques (les phares du Minou et de Portzic par exemple) suffisent à déterminer une position sur une carte géographique, dix points remarquables multiples ne permettent pas toujours de se positionner (des arbres par exemple).

Afin de vérifier cette hypothèse, Ungar et Blades (1996) demandent à un groupe de vingt-six sujets non-voyants d'explorer une carte comportant des points remarquables uniques et multiples. Ils guident ensuite les sujets de points en points. A chaque point, il est demandé aux sujets de se localiser sur la carte et d'estimer la direction d'un autre point. La réalisation de la tâche nécessite donc la coordination des référentiels égo et allocentrés. La moitié des essais est réalisée avec une carte alignée, alors que l'autre moitié utilise une carte non alignée tournée à quatre-vingt-dix degrés.

Les résultats montrent tout d'abord que les sujets non-voyants parviennent à se localiser sur une carte. Ensuite, il semble que les sujets commettent moins d'erreurs d'estimation lorsqu'ils se trouvent en un point remarquable unique que lorsqu'il se trouvent un point remarquable multiple. Par ailleurs, un constat surprenant concerne l'absence d'influence de la rotation de la carte. En effet, contrairement aux résultats de Passini *et al.* (1986), Rossano et Warren (1989a) Blades (1991), Ungar *et al.* (1995a) et Gaunet *et al.* (1997), les auteurs montrent que les sujets semblent se focaliser sur des séquences de points remarquables. Finalement, les auteurs remarquent que les sujets qui présentent les meilleurs résultats sont ceux qui vérifient leurs positions en identifiant le maximum de séquences de points remarquables potentiellement réalisées.

En résumé, les points remarquables uniques permettent un positionnement plus précis que les points remarquables multiples. Par ailleurs, la stratégie d'encodage des points remarquables les uns par rapport aux autres semble particulièrement propice à la coordination des référentiels spatiaux de types égo et allocentrés lorsqu'elle est associée à la mémorisation d'une séquence parcourue par le corps entier.

3.4.2.6 L'alignement des cartes en relief

Levine (1982) et Shepard et Hurwitz (1984) définissent l'alignement d'une carte par la loi : « en haut égale devant ». Autrement dit, ces auteurs montrent que les sujets voyants tendent à encoder les informations de la carte comme si elles étaient parallèles à l'environnement. Par la suite Rossano et Warren (1989a) révèlent la difficulté des voyants à réaliser les rotations mentales des éléments d'une configuration spatiale apprise au moyen d'une carte non-alignée.

Afin de vérifier si cet « effet d'alignement » se retrouve chez les aveugles, Rossano et Warren (1989b) demandent à dix sujets non-voyants d'apprendre une configuration spatiale composée de quatre éléments d'une pièce au moyen d'une carte en relief. Les sujets sont ensuite guidés au centre de la pièce et doivent pointer en direction des éléments évoqués par l'expérimentateur. Les conditions de carte « alignée » et « non-alignée » sont testées. En condition « alignée », l'erreur angulaire moyenne est inférieure à celle de la condition « contre-alignée ». Par ailleurs, les temps de réponses sont également plus longs en condition « non-alignée ».

Rossano et Warren (1989b) concluent que les sujets aveugles sont soumis à l'« effet d'alignement ». Ce résultat traduit une certaine similarité entre les processus impliqués dans les encodages spatiaux visuels et tactiles. Ainsi, la production de cartes géographiques en relief pour la vie quotidienne des aveugles est soumise aux contraintes de l'alignement.

3.4.2.7 L'utilisation des cartes en relief au quotidien

Espinosa *et al.* (1998) proposent les premières expériences permettant de vérifier l'utilité des cartes

dans le quotidien des personnes non-voyantes. Ils demandent à trente personnes ayant perdu la vue avant l'âge de six ans d'apprendre un trajet urbain de deux kilomètres comportant huit points remarquables.

Les auteurs soulignent la présence d'indices kinesthésiques (degrés de pente), auditifs (sons du trafic), tactile (textures des sols) et olfactifs (odeurs des jardins) pour le repérage des points remarquables sans la modalité visuelle. L'expérimentateur guide les sujets et leur annonce les noms des points remarquables au fur et à mesure de la route. Trois groupes sont composés, le premier apprend la route en la parcourant, le second dispose d'une carte en relief pendant le parcours et le troisième écoute une description verbale au fur et à mesure du trajet. Il est ensuite demandé aux sujets de réaliser l'itinéraire sans guide ni carte (*cf.* figure 3.12). L'expérimentateur arrête les sujets deux fois pour leur demander d'estimer les directions des différents points remarquables. Finalement, ils doivent trouver un raccourci pour revenir au point de départ. Chaque sujet réalise trois sessions. La distance parcourue en dehors de la route, le nombre de fois où les sujets se trompent de chemin, les erreurs angulaires et la qualité des raccourcis sont relevés et analysés. Les estimations et le raccourci ne sont demandés que dans la première et la dernière session. Les résultats montrent que les sujets ayant appris l'itinéraire par la combinaison du déplacement dans l'environnement et de l'exploration de la carte en relief construisent une représentation spatiale de la route plus précise.

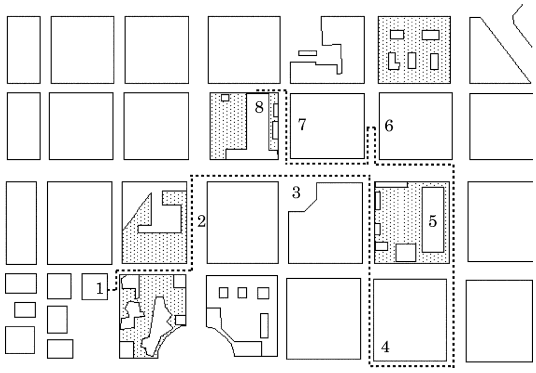


Figure 3.12 – Carte de la route utilisée par Espinosa *et al.* (1998). La ligne en pointillé représente le trajet parcouru et les numéros correspondent aux différents points remarquables.

3.4.2.8 La carte comme substitution à la locomotion

Au cours d'une seconde expérience Espinosa *et al.* (1998) cherchent à savoir si l'utilisation d'une carte en relief peut remplacer le parcours réel d'un trajet pour la construction d'une représentation spatiale non visuelle. Les sujets sont donc guidés par l'expérimentateur soit pour parcourir l'itinéraire dans l'environnement urbain, soit pour explorer la route sur la carte. Les résultats ne montrent pas de différence entre les deux procédés.

Ces résultats sont confirmés par ceux des expériences similaires de Jacobson (1998) et Blades *et al.*

(1999). Ces auteurs soulignent également que l'absence d'entraînement à l'utilisation de cartes en relief par les sujets aveugles par rapport à leur habitude à découvrir les trajets par expérience directe renforce encore la valeur des résultats. En effet, il semble que les individus privés de la vue parviennent naturellement à corréler les référentiels de type allocentré de la carte et égocentré de la navigation dans l'environnement. Ainsi, on peut penser que des entraînements leur permettraient d'acquérir un niveau de précision plus important. Par ailleurs, les auteurs rappellent que les cartes sont des moyens plus rapides et présentant moins de risques pour découvrir l'environnement et planifier des itinéraires de déplacement réel (*cf.* tableau 3.3).

3.4.3 Conclusion sur l'utilisation des cartes en relief

Les cartes en relief présentent l'avantage majeur de proposer aux personnes aveugles des représentations globales des espaces de navigation. Bien que leurs explorations manuelles restent relativement séquentielle, les études s'accordent sur l'efficacité de ces dernières pour l'encodage de configurations simples ou complexes. Des études montrent également que l'alignement de la carte avec l'environnement améliore la précision de la restitution des connaissances spatiales. Par ailleurs, la présence de points de repère se révèle indispensable pour l'utilisation d'une carte en relief en situation naturelle. Finalement, les cartes en relief s'avèrent être un moyen plus rapide et moins risqué que le déplacement du corps entier pour acquérir des connaissances spatiales sur l'environnement.

3.5 Synthèse sur la cécité et l'espace géographique

Les données de la littérature sur les capacités spatiales des personnes non-voyantes révèlent que si ces derniers souffrent d'un déficit de perceptions spatiales visuelles, ils n'en sont pas moins capables de raisonner sur l'espace. Leur difficulté réside donc principalement dans l'actualisation des informations sur l'espace à l'aide des modalités auditives et haptiques. Ensuite, l'observation des activités d'exploration de petits et grands espaces montre que les stratégies manuelles et locomotrices des aveugles sont particulièrement ressemblantes. Ces dernières présentent des *patterns* d'exploration s'inscrivant au sein de référentiels spatiaux de types égo et allocentrés. L'analyse de ces *patterns* permet l'identification de stratégies d'exploration et la proposition d'un modèle de coordination des référentiels pour la construction de représentations spatiales en situation de cécité. Les performances spatiales des non-voyants semblent être en relation avec leurs stratégies d'exploration. Ces stratégies semblent évoluer sous l'effet des processus ascendants et descendants. Ainsi, les mouvements d'exploration haptiques ou locomoteurs sont coordonnés avec les schémas de représentation de l'espace. Finalement, les résultats des différentes expériences impliquant des cartes en relief pour la navigation des aveugles montrent

qu'ils profitent largement des cartes géographiques pour combler leur déficit de perception d'informations spatiales de type allocentré. Cependant, ces cartes en relief ne permettent pas l'actualisation de leur position en cours de navigation, ce qui reste problématique.

Auteurs	Sujets	Buts	Protocoles	Résultats
Leonard et Newman (1967)	AC	Reconstruction d'une route sur une carte	Après un déplacement en milieu naturel connu une carte en relief est présentée aux sujets.	Les sujets sont en mesure d'identifier la route effectuée et de proposer des raccourcis.
Casey (1978)	AC et MV	Reconstruction d'un lieu sur une carte	Réalisation d'une maquette de leur établissement scolaire avec des blocs de bois.	Les aveugles de naissances construisent des maquettes moins précises que les mal-voyants.
Herman *et al.* (1983)	AC	Estimation de directions	Exploration d'une carte contenant 6 points avant de réaliser des tâches de mémoire et d'inférence entre les points dans un gymnase	Les tâches d'inférence sont aussi bien réussies que les tâches de mémoire.
Ungar *et al.* (1994)	AC, AT et MV	Estimation de directions	Exploration de la carte en relief ou navigation dans une pièce comportant 6 éléments.	Les enfants aveugles tirent plus profit des cartes que les enfants avec un résidu visuel .
Ungar *et al.* (1995b)	AC, AT et MV	Reconstruction d'une carte sur une carte	Exploration de la carte en relief d'un centre commercial	Les reconstructions de maquette sont mieux réussies par les enfants avec un résidu visuel mais certains aveugles de naissance réalisent de très bonnes performances.
Ungar et Blades (1996)	AC et AT	Réalisation d'une route et estimations des directions.	Navigation munie d'une carte en relief dans un environnement comportant des points remarquables uniques et multiples.	Les performances des sujets sont meilleures lorsqu'ils utilisent une stratégie d'encodage de la séquence des points remarquables. Pas d'influence de la rotation de la carte.
Espinosa *et al.* (1998)	AC et AT	Réalisation d'une route et d'un raccourci, estimations des directions.	Apprentissage d'un itinéraire soit par déplacement seul, soit par déplacement et carte, soit déplacement et description verbale.	Les performances des sujets sont meilleures lorsqu'ils utilisent la carte.
Jacobson (1998)	AC et AT	Reconstruction d'un lieu sur une carte	La reproduction des environnements connus a lieu en ayant exploré une carte ou non au préalable	Les aveugles tirent profit de l'utilisation de la carte.

Tableau 3.3 – Récapitulatif des principales expériences concernant l'utilisation des cartes en relief par les sujets aveugles congénitaux (AC), aveugles tardifs (AT) et malvoyants (MV))

Chapitre 4

Réalité virtuelle et navigation

Nous avons vu que les cartes en relief étaient un outil pour faciliter la construction de l'espace chez les non-voyants. Outre la difficulté de construire des cartes adaptées à chaque navigation, les cartes en relief ne sont pas interactives. Elles ne permettent donc pas l'entraînement à la navigation. Nous pensons que l'immersion dans un environnement virtuel permet d'atteindre cet objectif.

4.1 L'immersion en environnement virtuel

Qu'est-ce que la réalité virtuelle ?

Quelles sont ses avantages pour les tâches expérimentales ?

Quelles sont les conditions de l'immersion en environnement virtuel ?

4.1.1 Le principe

La réalité virtuelle peut être définie comme « une interface homme-machine évoluée qui simule des environnements réalistes avec lesquels les participants peuvent interagir (Ellis, 1994) ». Il s'agit d'un support favorisant l'imagination de l'action. Immergés dans un environnement virtuel, les sujets doivent prendre des décisions qui sont à la fois les causes et les conséquences de l'évolution des évènements. Lenay (2005) souligne à ce propos que le sentiment d'immersion apparaît lorsque les sujets disposent de retours sensoriels sur leurs propres actions (feedbacks). Par exemple, un système de réalité virtuelle de tennis déclenche un son et une vibration adéquats en plus de la visualisation de la trajectoire de la balle frappée afin de stimuler l'imagination du joueur. Pour Loomis *et al.* (1999), l'« immersion ultime » implique des interactions si naturelles entre le sujet et les objets de l'environnement virtuel qu'elles ne sont plus distinguées de l'expérience réelle. Cependant, pour Fuchs *et al.* (2006), « la finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une personne une activité sensorimotrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, qui peut-être imaginaire, symbolique ou

une simulation de certains aspects du monde réel » (p.3). Ainsi, l'objet de la réalité virtuelle ne se réduit pas *stricto sensu* à la reproduction du réel. En effet, si une certaine similarité entre les environnements virtuels et la réalité physique permet la création de contextes favorables à la projection dans l'action, parmi les valeurs ajoutées de la réalité virtuelle résident la possibilité d'agir sur des paramètres habituellement non accessibles, ou encore la capacité d'introduire des signifiants à vertus pédagogiques permettant d'expliciter l'implicite. Par exemple, les travaux de Parenthoën *et al.* (2004) permettent de simuler différents états de mer et d'y ajouter des artefacts. Ces derniers indiquent les zones de déferlement potentiellement dangereuses pour une embarcation. Elles se révèlent alors pertinentes pour l'apprentissage de la « lecture de vagues » du marin (*cf.* figure 4.1).

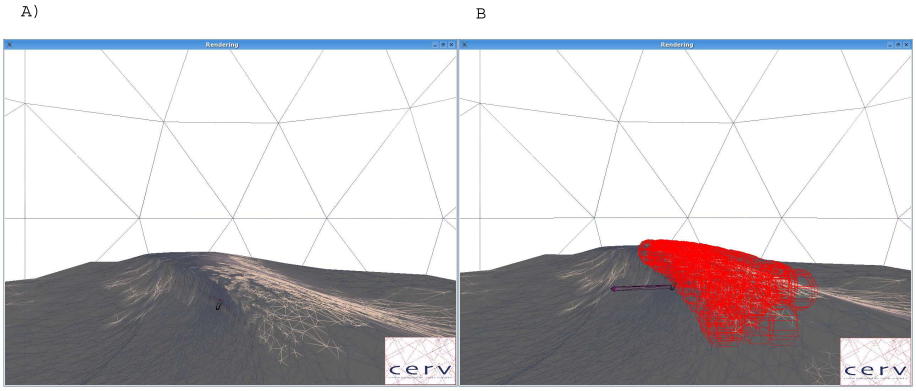


Figure 4.1 – Etat de mer virtuel (Parenthoën *et al.*, 2004). Grâce un moteur de simulation physique, les auteurs peuvent simuler l'état de mer réaliste présenté sur la figure A. La zone de déferlement potentiellement dangereuse est indiquée par un artefact visuel au niveau de la crête de la vague (zone rouge et foncée sur la figure B).

La réalité virtuelle est un outil de laboratoire dans le sens où elle permet donc un important contrôle des conditions expérimentales tout en simulant des conditions naturelles. En effet, jusqu'à présent le contrôle précis des variables recquérait des conditions classiques de laboratoire assez éloignées de celles du milieu naturel et plongeait l'expérimentateur dans une certaine ambivalence. Loomis *et al.* (1999) soulignent que la réalité virtuelle est un outil fournissant un compromis entre ces deux variables grâce à l'utilisation d'interfaces spécifiques. Plus précisément, la simulation générant des stimulations des différentes modalités sensorielles grâce à des interfaces auditives et haptiques en plus des interfaces graphiques permet d'augmenter le réalisme des environnements virtuels et améliore ainsi leur « validité écologique » (*cf.* figure 4.2).

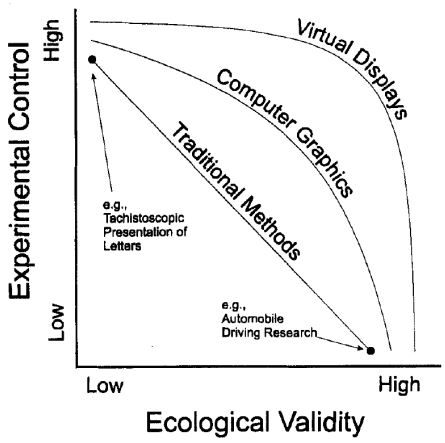


FIGURE 4.2 – Compromis entre le contrôle expérimental (*experimental control*, ici en ordonnée) et la correspondance avec la situation naturelle (*ecological validity* ici en abscisse) (Loomis *et al.*, 1999). L'utilisation d'interfaces multimodales (*virtual display*) permet l'élaboration d'environnement présentant d'importantes valences sur les deux axes et met fin à l'ambivalence propre aux méthodes traditionnelles (*traditionnal methods*).

4.1.2 La complémentarité interface - programme informatique

Durlach et Mavor (1995) et Stanney et Salvendy (1998) distinguent deux composants nécessaires à l'immersion. Le premier est constitué par les interfaces (*virtual display*) qui produisent les stimuli sensorimoteurs directement perçus par le sujet. Le second se compose d'un programme informatique (*virtual environment*). Les interfaces peuvent prendre différentes formes. Ainsi, les lunettes de vision en trois dimensions, les bras à retour de force et les systèmes de spatialisation sonore en sont les principaux représentants. Cependant, d'une manière générale, tout type d'interface pouvant être géré par un programme informatique a le potentiel de participer à un système de réalité virtuelle. Le rôle du programme informatique est d'appliquer les lois qui régissent l'environnement virtuel et commandent les réactions de l'interface en fonction des actions du sujet. Ainsi, le pouvoir immersif d'un système de réalité virtuelle est directement dépendant de l'adéquation entre les outils au contact de l'utilisateur et le programme informatique qui les pilote. Pour Waller *et al.* (1998) cette adéquation est dépendante de la qualité de l'interface (« *interface fidelity* ») et de l'environnement (« *environmental fidelity* »).

L'espace de simulation comporte un caractère « distal » (Auvray, 2004). Autrement dit, il existe une distance entre les « perceptions organiques » dues aux contacts réels avec les interfaces, et les « perceptions distales », sortes de perceptions virtuelles résultantes de l'association des perceptions organiques et du contexte de l'environnement simulé. Avant de vivre des « expériences distales », l'auteur précise que l'appropriation de l'outil responsable de l'immersion se déroule suivant cinq étapes.

1. La prise de *contact* consiste à comprendre les règles sensorimotrices permettant d'interagir avec

l'interface. Par exemple, lorsque le sujet découvre la taille de l'espace de travail d'un bras à retour d'effort, c'est-à-dire ses limites mécaniques.

2. L'*attribution distale* des sensations à l'outil est la compréhension que les informations perçues sont générées par l'outil. Par exemple, lorsque le sujet aveugle utilise sa main libre pour se rendre compte que ce sont les moteurs de l'interface haptique qui créent une résistance sur son autre main et non le contact avec un véritable objet.

3. La *maîtrise de l'espace perceptif distal* nécessite que l'utilisateur soit en mesure d'établir des relations spatiales entre les différents éléments de l'environnement virtuel. Par exemple, lorsque le sujet intègre l'échelle de grandeur d'une carte géographique virtuelle et devient capable d'estimer les distances séparant deux bâtiments de cet environnement.

4. L'étape de la *localisation distale* est atteinte lorsque l'utilisateur imagine se trouver dans l'environnement virtuel par la médiation technique de l'outil (*cf.* figure 4.3). Par exemple, lorsqu'un sujet aveugle utilise un bras à retour de force comme une « canne blanche virtuelle ».

5. La *constitution d'une expérience distale* implique que l'utilisateur s'approprie les perceptions issues de l'environnement virtuel comme une expérience vécue. Celle-ci, bien que virtuelle, est porteuse de sens, de valeurs et d'émotions pour l'utilisateur. Par exemple, lorsqu'un utilisateur se protège le visage avec les mains lors d'un « crash » virtuel, il constitue une véritable expérience émotionelle.

Outre l'adéquation entre l'interface et le programme, l'appropriation de l'outil est essentielle pour l'immersion au sein de l'espace d'un système de réalité virtuelle. Au fur et à mesure des étapes d'Auvray (2004), nous assistons au passage d'une conception de l'interface à la troisième personne, considérée comme un outil à maîtriser, à une représentation de l'interface à la première personne, soit une assimilation à une prolongation du corps (*cf.* figure 4.3). Tout comme le joueur de tennis avec sa raquette ou l'aveugle avec sa canne, l'utilisateur ne se différencie plus nécessairement de l'outil. Il est alors en mesure de s'immerger dans l'environnement depuis un point de vue de type égocentré. D'une certaine manière l'appropriation de l'interface change le point de vue du sujet. Cependant la manière dont l'utilisateur interagit avec l'environnement virtuel dépend également des règles inhérentes au programme informatique. Par exemple, un programme ne proposant à l'utilisateur qu'une vue fixe et aérienne de l'espace ne peut lui fournir qu'une représentation s'inscrivant dans un référentiel de type allocentré même si ce dernier s'est approprié l'outil. Ainsi, dans un environnement virtuel pour la navigation, les interactions de l'utilisateur avec l'interface et le programme peuvent aussi bien donner lieu à une immersion s'inscrivant dans un référentiel de type égocentré qu'allocentré.

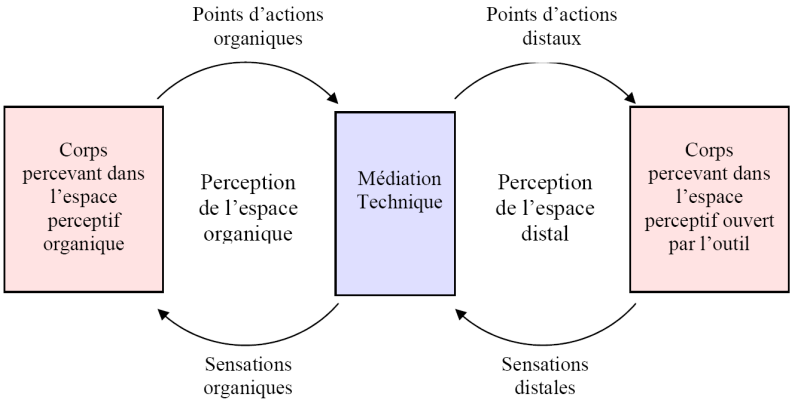


FIGURE 4.3 – Mécanismes perceptifs mis en œuvre lors de de la médiation technique (Auvray, 2004). Ce schéma illustre comment la conscience de l'outil (*médiation technique*) se trouve au carrefour entre les espaces perceptifs organiques et distaux. Par ailleurs, il montre l'articulation des feed-back (*sensations organiques*) avec les actions (*points d'actions organiques*).

4.1.3 Conclusion sur l'immersion en environnement virtuel

Grâce à la réalité virtuelle, il est possible de reproduire artificiellement des situations proches des situations naturelles. La maîtrise des différents paramètres permet un contrôle précis des conditions expérimentales. Les situations simulées ne présentent d'intérêt que si les sujets sont immergés. Lorsque l'adéquation entre le programme informatique et l'interface utilisé est efficace, les sujets font abstraction de l'interface pour interagir directement avec l'environnement virtuel. Les mécanismes cognitifs sollicités semblent être identiques à ceux impliqués en situation naturelle.

4.2 La navigation virtuelle

Nous avons vu l'intérêt de la coordination des référentiels spatiaux de types égo- et allocentrés pour la navigation (*cf.* § 2.2.3 p.72). Pour (Wickens et Baker, 1995), la gestion des points de vue de l'utilisateur est un enjeu majeur pour l'apprentissage de connaissances spatiales au sein des environnements virtuels.

Quel est le potentiel actuel de la réalité virtuelle pour l'entraînement à la navigation ?

Les environnements virtuels permettent-ils de coordonner les représentations issues des différents types de référentiels spatiaux ?

Dans quelle mesure les transferts d'apprentissage entre les environnements virtuels et les situations naturelles sont-ils envisageables ?

4.2.1 La multiplication des points de vue

Tlauka et Wilson (1996) cherchent à évaluer l'impact des navigations en environnement virtuel selon différents points de vue visuels. Pour ce faire, ces auteurs demandent à leurs sujets d'apprendre un environnement composé de huit éléments au moyen d'une carte classique ou d'une navigation virtuelle. Ils mesurent ensuite les estimations de directions en condition alignée, où les axes des sujets et de l'environnement sont confondus ; et en condition non alignée, où ces axes diffèrent. A la suite de l'apprentissage de la carte classique, les réponses aux questions alignées sont meilleures que celles aux questions non alignées. L'inverse se produit à la suite des navigations virtuelles. La multiplication des points de vue en environnement virtuel semble donc permettre la construction d'une représentation spatiale améliorant la coordination des référentiels de types égo et allocentrés. Ces résultats s'accordent avec ceux de Christou et Bülthoff (2000) pour souligner l'importance du contexte environnemental dans la construction des invariants et l'encodage d'une représentation spatiale efficace.

4.2.2 La coordination des points de vue

Cherchant à expliquer les processus de coordination des points de vue, Amorim (2003) utilise un environnement virtuel dans lequel il demande aux sujets d'observer une scène pendant cinq secondes. Cette scène contient un objet remarquable et un « avatar », c'est-à-dire un personnage virtuel. La position et l'orientation de l'« avatar » correspondent aux futurs points de vue des sujets, l'auteur appelle cette information l'« amorçage ». Une fois les cinq secondes écoulées, les sujets changent de points de vue et prennent celui de l'« avatar », il leur est alors demandé d'évaluer si l'objet remarquable a changé de position ou non. Un groupe de contrôle réalise la même tâche sans « amorçage ». Au cours de cette expérience, l'auteur différencie des environnements « borné » et « ouvert ». Alors que le premier est fini par des murs, c'est-à-dire délimité selon une forme géométrique ; le second ne comporte que des éléments remarquables (ici du mobilier), c'est-à-dire qu'il se compose d'une configuration de points (*cf.* figure 4.4A). En environnement « borné », les performances des sujets montrent qu'ils profitent de l'« amorçage ». A l'inverse, en environnement « ouvert », les résultats ne révèlent pas d'amélioration due à l'anticipation du changement de point de vue (*cf.* figure 4.4B).

L'anticipation d'un point de vue différent du point de vue initial d'encodage semble bénéfique pour la construction d'une représentation spatiale favorisant la coordination des référentiels de type égo et allocentrés lorsque les individus peuvent extraire des invariants géométriques de l'environnement.

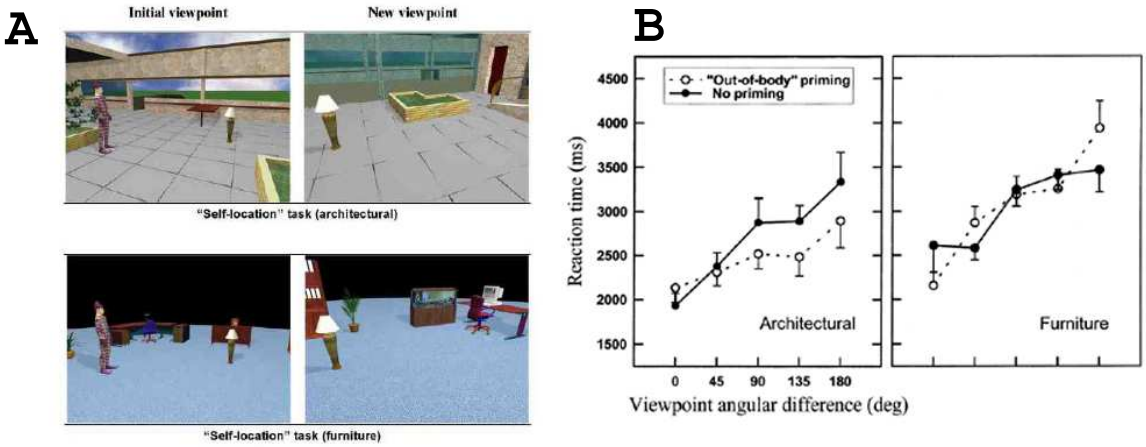


FIGURE 4.4 – Mondes virtuels (figure A) et résultats (figure B) de l'expérience d'Amorim (2003). Les deux vignettes du haut de la figure A représentent les environnements « bornés » (« *architectural* ») ; celles du bas, les environnements « ouverts » (« *furniture* »). Les deux vignettes de gauche illustrent la présence d'« avatars ». Le graphique de la figure B montre qu'en environnement « borné » les temps de réaction (axe des ordonnées) sont plus courts en condition d'amorçage (cercles blancs : « *out-of-body priming* ») que dans la condition de contrôle (cercles noires : « *no priming* ») Ces résultats ne se retrouvent pas en environnement « ouvert ».

Suivant la même problématique, Schafer et Bowman (2004) imaginent une tâche de coordination des points de vue collectifs. Ainsi, ils demandent à des binômes de sujets de coopérer pour retrouver rapidement des objets dans un environnement virtuel de navigation. Les points de vue des sujets peuvent être de types égocentré (*cf.* figure 4.5.A) ou allocentré (*cf.* figure 4.5 B.). Les auteurs testent ainsi les binômes « égo-égo », « allo-allo » et « égo-allo ». Les meilleures performances sont obtenues pour le binôme « égo-allo ». Les auteurs suggèrent donc que, comme pour la navigation réelle, la navigation virtuelle nécessite de coordonner ces deux types de référentiels spatiaux.

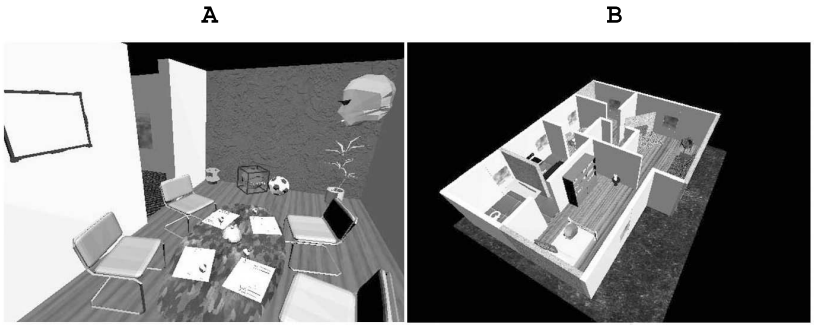


FIGURE 4.5 – Vues virtuelles s'inscrivant dans des référentiels spatiaux de types égo- (A) et allocentrés (B) lors de l'expérience de Schafer et Bowman (2004).

4.2.3 Le transfert d'apprentissage en environnement naturel

Si les environnements virtuels sollicitent les mêmes processus que dans les environnements réels, alors nous pouvons nous attendre à ce que des transferts d'apprentissage depuis le virtuel vers le réel apparaissent.

Peruch *et al.* (1995) montrent en effet que les transferts d'apprentissage de connaissances spatiales entre des mondes virtuels et réels sont possibles en environnements minimalistes, c'est-à-dire composés de formes géométriques simples.

La ville est créée par l'Homme suivant des régularités géométriques. Elle contient de nombreux points de repères explicites tels que des panneaux ou des noms de rues. A l'inverse, les grands espaces naturels ne contiennent pas de points remarquables explicites. De plus, les déplacements ne sont pas guidés par des routes. Ainsi, Darken et Banker (1998) soulignent la difficulté d'un repérage spatial en environnement naturel. Afin d'évaluer les apports de la réalité virtuelle pour ce type d'apprentissage, les auteurs expérimentent la situation de l'entraînement à la course d'orientation. Cette discipline sportive consiste à atteindre un certain nombre de marques disposées dans la nature. Les pratiquants disposent d'une carte géographique et d'une boussole dans un espace défini.

Dans cette expérience, il est demandé aux sujets de réaliser un itinéraire avec une carte. Les données recueillies sont le nombre d'erreurs et les distances parcourues lors de la réalisation de l'itinéraire. Les auteurs testent les trois conditions. La première consiste à préparer l'itinéraire avec la carte et un environnement virtuel ; la seconde consiste à préparer l'itinéraire avec la carte mais sans environnement virtuel. Dans la troisième les sujets ne préparent pas l'itinéraire. Les résultats révèlent que les sujets préparant leur itinéraire avec la carte sans environnement virtuel » réalisent les meilleures performances. Cependant ceux qui préparent leur itinéraire avec la carte et un environnement virtuel sont plus efficaces que ceux ne préparant pas leur itinéraire. Les auteurs expliquent ces résultats par l'habitude des sujets à fonctionner de cette manière. Néanmoins les sujets de niveau intermédiaire profitent largement de l'association des vues de type égo- (*cf.* figure 4.6A) et allocentrées (*cf.* figure 4.6B) proposées par l'environnement virtuel. Ainsi, Darken et Banker (1998) concluent qu'un monde virtuel peut entraîner à la navigation en espace naturel.

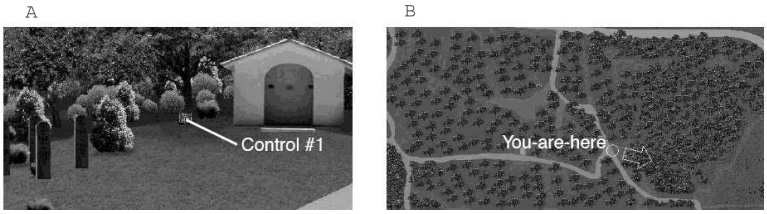


Figure 4.6 – Environnement virtuel utilisé par Darken et Banker (1998) pour l'expérience de la course d'orientation. A gauche se trouve la visualisation actualisée de type égocentré (A). A droite se trouve la visualisation actualisée de type allocentré (B).

Dans le prolongement des travaux de Darken et Banker (1998), les études traitant du transfert d'apprentissage spatial (Waller *et al.*, 1998; Witmer *et al.*, 2002; Farrell *et al.*, 2003) arrivent à des conclusions similaires. Ainsi, les résultats de l'expérience de Waller *et al.* (1998) soulignent l'importance du temps d'immersion. Apparemment, un temps d'entraînement trop bref ne permet pas de transfert efficace. De plus, Witmer *et al.* (2002) précisent que les bénéfices d'une visualisation de type allocentré sont plus durables que ceux d'une vue de type égocentré. Par ailleurs, les résultats des expériences de Farrell *et al.* (2003) mettent en avant la nécessité d'une exploration active dans l'environnement virtuel pour la coordination des référentiels spatiaux et la présence d'un transfert en environnement réel. Finalement, Jansen-Osmann (2007) évoquent la nécessité d'investiguer l'influence de la régularité de la structure de l'environnement pour la construction d'une représentation spatiale associant les référentiels de type égo- et allocentrés en environnement virtuel (*cf.* §2.2.2).

4.2.4 Conclusion sur les environnements virtuels de navigation

En Bref, les études ci-dessus et d'autres traitant de la coordination des référentiels spatiaux (Satalich, 1995; Darken et Sibert, 1996; Bliss *et al.*, 1997; Ruddle *et al.*, 1997; Chance *et al.*, 1998; Gillner, 1998; Amorim *et al.*, 2000; Vidal *et al.*, 2004; Tlauka *et al.*, 2005; Smith *et al.*, 2008) montrent que les environnements virtuels mettent en œuvre les mêmes processus de cognition spatiale que dans la réalité. En effet, les résultats concernant la création de connaissances spatiales de type carte ou route, en fonction des changements de points de vue correspondent à ceux des études connues en environnements réels. Ainsi, les expériences des « trois montagnes » de Piaget et Inhelder (1948), des « *loci* » (lieux) de Lea (1975) et des navigations directes ou cartographiques de Thorndyke et Hayes-Roth (1982) arrivent aux mêmes conclusions. Plus précisément, il apparaît que la multiplication des points de vue, la présence de points remarquables et la combinaison des représentations spatiales de types égo- et allocentrés améliorent l'actualisation de la position et l'inscription de celle-ci dans une représentation globale de l'espace que ce dernier soit virtuel ou bien réel.

De leur coté, Peruch et Gaunet (1998) identifient deux intérêts majeurs de l'emploi de la réalité

virtuelle pour l'étude de la cognition spatiale. Tout d'abord l'informatique offre de nouveaux moyens pour recueillir des données concernant des comportements spatiaux dynamiques (e.g. séquences d'exploration haptique). Ensuite, les environnements virtuels permettent de réaliser des expériences simulant des navigations dans de grands espaces naturels tout en maîtrisant des paramètres tels que la complexité de la tâche, l'activité des autres entités de l'environnement (les piétons par exemple) ou encore les conditions météorologiques (le vent par exemple). Pourtant ces mondes virtuels présentent tout de même des limites. Ainsi, Witmer *et al.* (1996) soulignent quelques problèmes liés aux environnements virtuels de formation spatiale tels que le mal des simulateurs ou la désorientation par exemple. Finalement, bien que des interfaces auditives et haptiques existent, Peruch et Gaunet (1998) soulignent que les environnements virtuels utilisent majoritairement le rendu visuel.

4.3 La cécité dans les environnements virtuels de navigation

Quels sont les interfaces et/ou les programmes auditifs et haptiques permettant aux aveugles d'interagir avec les environnements virtuels ?

Comment et dans quelles mesures les utilisateurs non voyants acquièrent-ils des connaissances spatiales à partir de ces environnements ?

Ces apprentissages sont-ils transférables ?

4.3.1 Les environnements virtuels auditifs

4.3.1.1 Les systèmes de spatialisation du son

Bien que la modalité auditive semble peu utilisée pour l'interprétation d'informations spatiales (Bregman, 1994), la perception des distances et des directions d'une source sonore reste possible même si elle est relativement peu précise (Golledge, 1991). Les systèmes de spatialisation du son permettent la création de sons virtuels localisés dans l'espace (Kramer, 1993).

La spatialisation artificielle d'un son implique la modulation des délais et de l'amplification des signaux destinés aux enceintes. Plus précisément, les programmes qui pilotent la coordination des enceintes jouent sur la différence de temps d'arrivée entre les deux oreilles, c'est-à-dire l'ITD (« *Interaural Time Delay* ») ; et la différence d'intensité d'arrivée entre les deux oreilles, c'est-à-dire l'ILD (« *Interaural Level Delay* ») (Viste, 2004). Ainsi, il devient possible de donner l'impression à l'auditeur que les sons proviennent de localisations virtuelles. Par exemple, dans le cas de l'utilisation de deux enceintes, si le cri d'un goéland est émis plus fort par l'enceinte située à gauche, alors l'utilisateur

percevra l'oiseau plutôt sur la gauche. De la même manière, si le cri est émis légèrement plus tôt d'un côté, il sera perçu de ce côté là.

Il existe différentes interfaces sonores. Ces dernières diffèrent notamment en fonction du nombre de haut-parleurs.

Les systèmes de spatialisation du son les plus simples et les plus utilisés sont stéréophoniques, c'est-à-dire qu'ils comportent deux haut-parleurs et permettent ainsi des variations de perceptions des azimuts des sources sonores selon un axe droite-gauche (*cf.* figure 4.7).

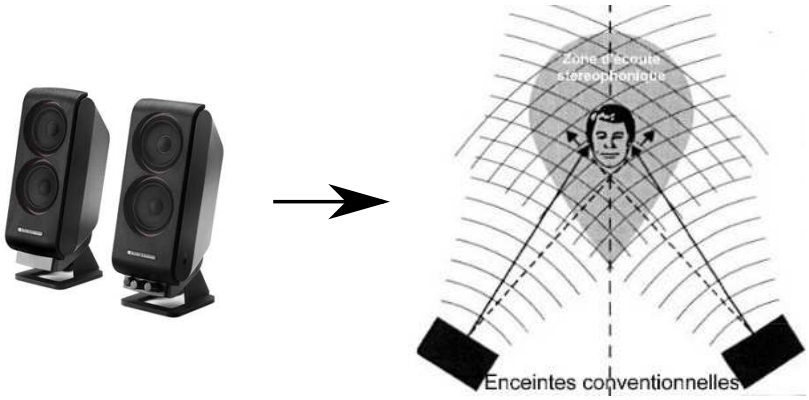


Figure 4.7 – A l'aide des deux haut-parleurs d'un système stéréophonique, il est possible de générer des sons perçus sur un axe droite-gauche

Au sein d'un système de son spatialisé, quatre haut-parleurs au minimum sont nécessaires pour pouvoir produire des sons en provenance de tous les azimuts. Par ailleurs, plus le nombre de haut-parleurs est grand plus la précision de la localisation virtuelle est importante (*cf.* figure 4.8).

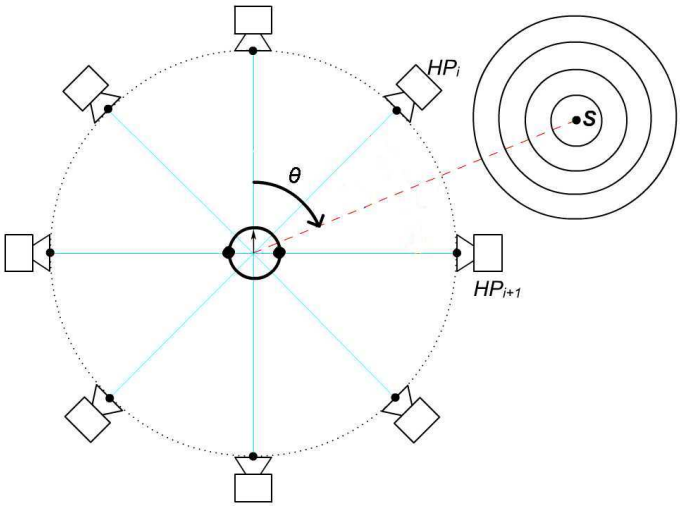


Figure 4.8 – Système de son spatialisé comportant huit haut-parleurs. Sur cette figure l'azimut θ est généré par les haut-parleurs HPi et HPi+1. Bien qu'aucune source sonore n'existe à l'azimut de S, le sujet la perçoit là où elle est représentée sur la figure.

Tran *et al.* (2000) réalisent des expériences en environnements virtuels pour déterminer si le son peut-être utilisé comme indice spatial. Les résultats montrent que les précisions des azimuts estimés varient entre sept et quinze degrés lorsque les sources sonores sont situées à environ six mètres de distance dans le plan frontal des sujets. Bien que cette précision soit toute relative, ces résultats confirment la possibilité de construire une représentation spatiale à partir d'indices sonores. Par ailleurs, les auteurs comparent différents types de sons et concluent qu'un son d'une hauteur tonale moyenne est mieux localisé qu'un son très aigu ou très grave. Pour une localisation optimale en distance et en orientation, Tran *et al.* (2000) conseillent l'utilisation d'un son évoquant un sonar de sous-marin émit 1,1 fois par seconde.

4.3.1.2 Les différents principes de simulations auditives

- La sonification

Afin d'améliorer l'immersion dans les environnements virtuels, Kramer (1993) introduit le procédé de la « *sonification* ». Cette technique consiste à utiliser des sons réalistes, différents du langage, pour transmettre des informations aux utilisateurs. Ces informations réalistes sont également appelées icônes auditives. Pour « *sonifier* » un environnement, la méthode la plus simple consiste à enregistrer des sons dans le milieu naturel pour les réintroduire dans l'environnement virtuel. Pour Shilling et Shinn-Cunningham (2002), la *sonification* est un moyen non visuel d'informer les utilisateurs sur les caractéristiques d'un environnement complexe sans avoir recours à de longs discours. Par exemple, dans un environnement urbain virtuel, les sons spatialisés des voitures qui passent d'un

côté, et les sons des pas des piétons qui marchent de l'autre, offrent des informations spatiales plus intuitives que la narration de la scène.

- Les « *Earcons* »

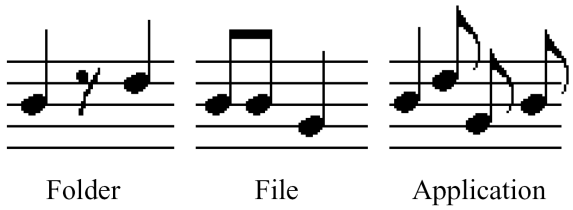


Figure 4.9 – *Earcons* de Brewster *et al.* (1992). De gauche à droite, ces différents sons indiquent aux sujets aveugles s'ils déplacent leur curseur sur l'icône d'un dossier (« *folder* »), d'un fichier (« *filr* ») ou d'une application (« *application* »).

Blattner *et al.* (1989) introduisent le terme d'« *earcon* ». Ce terme ne désigne non plus des informations auditives concrètes et naturelles mais à l'inverse des sons abstraits et spécifiquement définis. Les *earcons* font l'objet d'un apprentissage afin de pouvoir être utilisées. Brewster *et al.* (1992) définissent des paramètres efficaces pour différencier les *earcons*. Ainsi, les variations de timbre (harmonique), de note (hauteur tonale), de registre (octave), de rythme, d'intensité (volume) et de combinaison (mélodie) permettent la création d'une multitude de sons bien distincts. Une *earcon* devient porteuse d'information lorsque l'utilisateur connaît le code de signification des sons. Au cours d'une expérience sur un bureau d'ordinateur, Brewster *et al.* (1992) montrent que les sons des notes de la figure permettent aux personnes aveugles de savoir si leur curseur se trouve sur l'icône d'un dossier, d'un fichier ou d'une application (*cf.* figure 4.9).

- Les « *Landcons* »

Plus récemment, s'inspirant d'un environnement virtuel acoustique pour la formation des pilotes de la NASA, Lutz (2006) invente les *landcons*. Ces derniers sont des points remarquables (« *landmarks* ») virtuels dont le rendu sonore est un mélange des principes de la sonification, d'*earcons* et de l'information verbale. Outre la possibilité de demander manuellement le nom, la distance et la direction de ce point dans un référentiel spatial de type allocentré, l'auteur expérimente deux modes de présentation des informations *sonifiées* dans un référentiel de type allocentré. Dans un premier mode, l'utilisateur perçoit un son réaliste du point remarquable seulement s'il lui fait face. Dans un second mode, l'utilisateur perçoit le son spatialisé de ce point uniquement lorsque sa route s'en écarte. Il s'agit ici d'une sorte de rappel à l'ordre en cas de « déroute ». Bien que ces modes de présentation de l'information nécessitent d'être validés, le principe des *landcons* consistant à associer informations verbales et *sonifiées* pour la localisation auditive de points remarquables virtuels semble permettre

l'association d'informations s'inscrivant dans les référentiels de types égo et allocentrés.

En résumé, la spatialisation auditive, la *sonification*, les *earcons* et les *landcons* permettent l'apport d'informations auditives spatiales non-verbales. Les aides auditives se révèlent donc prometteuses pour l'adaptation des programmes informatiques et la mise au point d'aides à la mobilité pour les personnes aveugles (Golledge et Stimpson, 1997; Massof, 2003).

4.3.1.3 Les applications auditives adaptées aux aveugles

- Les aides auditives pour la réalisation d'itinéraires définis

Loomis *et al.* (1998a) expliquent que les outils permettant aux personnes non-voyantes de réaliser un itinéraire défini dans un environnement inconnu se composent généralement de trois modules : un module de détermination de la position et de l'orientation de l'utilisateur, un module d'informations géographiques et une interface pour l'utilisateur (*cf.* figure 4.10).

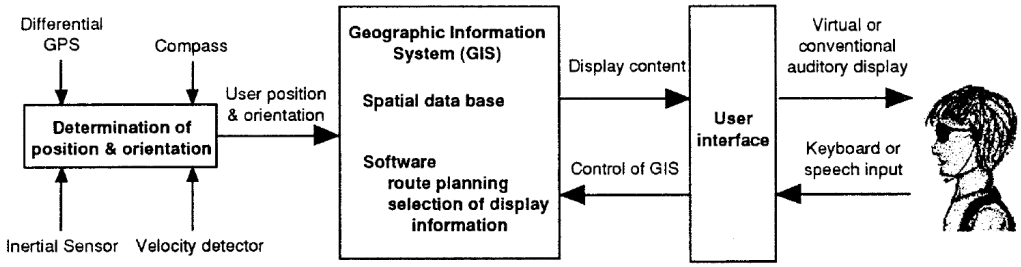


Figure 4.10 – Les composants fonctionnels des aides auditives pour la navigation des aveugles (Loomis *et al.*, 1998a). Le module de détermination des positions et orientations (« *détermination of position and orientation* ») interprète principalement les signaux d'un système de positionnement par satellite (« *Différential GPS* ») et d'une boussole (« *Compass* »). Le module d'informations géographiques (« *Geographic information system* ») questionne une base de données (« *Spatial data base* ») en fonction des positions et orientations de l'utilisateur. L'interface utilisateur (*User interface*) traduit ces informations en contenus auditifs verbaux ou non en fonction des demandes de l'utilisateur.

De nombreux systèmes différents permettent aux aveugles de planifier des itinéraires. Ainsi, *Wayfinder* de la société *Talknav*, *Blind Navigator* de la société *BestPluton*[@], *AtlasTalk* et *Gpstalk* de la société *Sendero*[β], proposent de « tourner à droite et à gauche » pour atteindre un point de route. Cependant, ne proposant pas d'autres informations sur l'environnement, les paroles qu'ils fournissent ne peuvent permettre que la construction de représentations spatiales s'inscrivant dans un référentiel

[@] bestpluton.free.fr

[β] www.senderogroup.com

de type égocentré.

A l'inverse, le *Strider* (Fruchterman, 1996) de la société Arkenston[γ] contient des informations géographiques détaillées. Des descriptions d'itinéraires suivant des indications de directions cardinales (nord, sud,...) sont disponibles. Cependant, le *Strider* n'utilise ni boussole, ni GPS. Cette application permet donc la préparation d'itinéraires dans un référentiel de type allocentré mais ne fournit pas d'informations actualisées en cours de navigation dans un référentiel de type égocentré.

Le système *MoBIC* (*Mobility of Blind and Elderly People Interacting with Computers*) (Petrie *et al.*, 1997) fonctionne de la même manière que le *Strider* mais délivre également des informations de position (*via* le réseau de téléphonie mobile) et d'orientation (*via* un compas) pendant le déplacement. L'outil issu du projet *MoBIC* fournit donc des informations issues des référentiels de types égo et allocentrés.

D'autres projets tels que celui de Makino *et al.* (1996) et Talkenberg (1996) (« *The Electronic Guide Dog* ») ont les mêmes fonctionnalités et sont incorporés à des téléphones mobiles afin de limiter la quantité de matériel à transporter.

Finalement, le *Trekker* de la société *Visuaide*[δ] est un GPS vocal largement utilisé dans la communauté des personnes aveugles. Ce système est de la taille d'un téléphone mobile et offre les possibilités de planifier des itinéraires dans un référentiel de type allocentré et d'interroger des informations de type égocentré en cours de navigation.

Par ailleurs, Loomis *et al.* (1998a) mettent au point le *Personal Guidance System*. Ce système présente la particularité de proposer des informations verbales ou des sons spatialisés. Au cours de leurs déplacements, les utilisateurs portent des écouteurs stéréophoniques dans lesquels ils entendent les annonces des points de route. Ce système fait l'objet d'une expérience comparant la précision des parcours réalisés par les sujets aveugles en fonction des différents modes de présentation de l'information. D'une manière simplifiée, il est demandé aux sujets de réaliser un itinéraire de neufs segments soit en étant dirigés vers les points de route par des informations verbales (« à droite » ou « à gauche ») soit par des informations auditives (« point 1 » annoncé à droite ou à gauche). Les résultats montrent de meilleures performances de navigation lors de l'utilisation d'informations sonores spatialisées (*cf.* figure 4.11). En cours de navigation les informations de type égocentré semblent donc favoriser l'atteinte d'un point.

[γ] www.flora.org/lapierre/strider.htm
[δ] www.visuaide.com

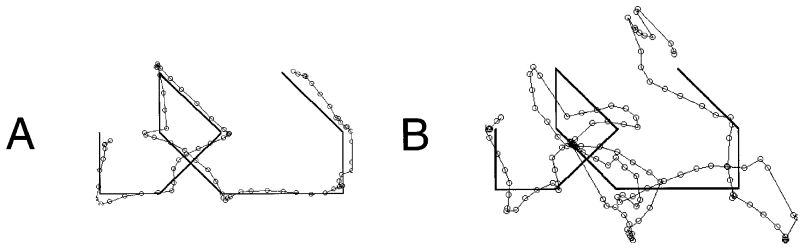


Figure 4.11 – Exemples d'itinéraires demandés et réalisés lors de l'expérience de Loomis *et al.* (1998a). Les traits épais représentent l'itinéraire indiqué par le *Personal Guidance System*, les traits fins avec les cercles représentent les trajectoires réalisées par les sujets enregistrées par le GPS. Les traces de la figure A correspondent à un exemple de la condition « son spatialisé », celles de la figure B correspondent à un exemple de la condition « vocale ».

- Deux exemples d'environnements virtuels auditifs pour la représentation spatiale

L'application *Audiodoom* de Lumbreras et Sánchez (1999) constitue un premier exemple. En effet, dans un souci d'utiliser l'informatique pour aider les aveugles à améliorer leurs connaissances spatiales, ils cherchent à évaluer les représentations spatiales construites par de jeunes aveugles en naviguant dans un environnement virtuel composé d'informations auditives spatialisées. Les auteurs conçoivent ainsi l'application *Audiodoom*. Ce monde sonore se compose de salles, de couloirs, de portes, de monstres et de munitions (*cf.* figure 4.12.B) et l'objectif est de trouver la sortie sans se faire tuer. Dans ce logiciel, chaque son correspond à un de ces éléments. L'utilisateur entend ces sons devant, à gauche ou à droite grâce à un système sonore stéréophonique (*cf.* figure 4.12.A). Il se déplace avec les flèches, ouvre les portes, tire sur les monstres et ramasse les munitions avec la barre d'espace. Afin d'évaluer les représentations spatiales élaborées au cours des déplacements dans le monde d'*Audiodoom*, Lumbreras et Sánchez (1999) demandent à sept enfants déficients visuels âgés de sept à onze ans de construire le plan du monde avec des *Légos* à la fin de la partie (*cf.* figure 4.12.C).

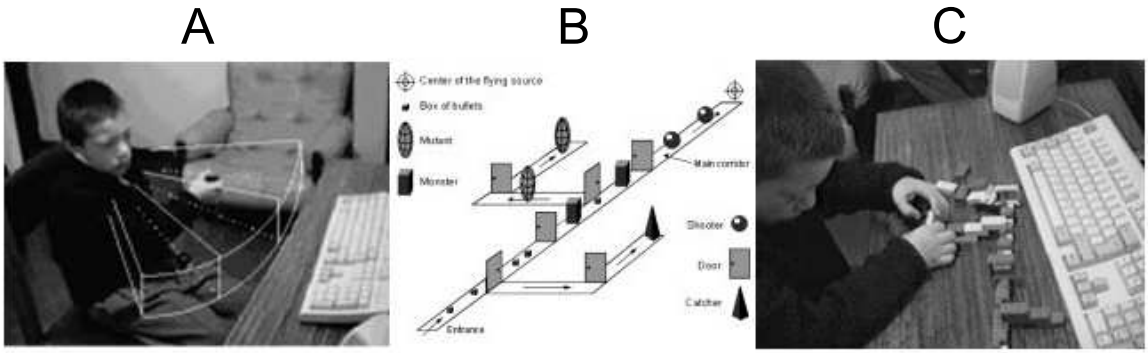


Figure 4.12 – *Audiodoom*, un environnement sonore spatialisé (Lumbreras et Sánchez, 1999). La figure A représente les différents azimuts sonores : devant, à droite, à gauche. Le sujet aveugle montre la direction dans laquelle il perçoit le son. La figure B est le plan du monde virtuel comportant des couloirs, des portes, des monstres et des munitions. La figure C illustre l'activité de reconstruction du plan du monde avec des *Légos* par un enfant aveugle.

Dans le cas de cartes ne comportant que des angles droits afin de pouvoir utiliser des *Légos* pour les reproduire, les résultats montrent que les plans élaborés par les sujets sont parfaitement cohérents. La navigation en environnement sonore virtuel permet donc la construction de représentations spatiales simplifiées. Du point de vue des référentiels spatiaux, la navigation virtuelle dans un environnement auditif s'inscrivant dans un référentiel de type égocentré permet donc la création d'une maquette. Ensuite les contacts multiples avec celle-ci sont susceptibles de donner lieu à des représentations s'inscrivant dans un référentiel de type allocentré. Par la suite, les applications utilisant des environnements sonores spatialisés tels que *VirtualAurea* (Sánchez *et al.*, 2000), *Audiometro* (Sánchez et Sáenz, 2006) et *AudioMUD* (Sanchez et Hassler, 2007) confirment ces résultats.

L'environnement virtuel auditif *Amandine* mis au point par Afonso *et al.* (2005) présente un second exemple. Cet environnement implique une salle réelle et une salle virtuelle. L'utilisateur porte un « traqueur » sur la tête afin que sa position réelle puisse être capturée par une caméra située au dessus de la pièce et reportée dans la salle virtuelle. Des haut-parleurs disposés en cercle permettent à l'expérimentateur de générer des objets sonores virtuels autour de l'utilisateur. Au cours de l'expérience, les sujets aveugles sont placés au centre de la pièce d'où ils peuvent percevoir six sources sonores virtuelles. Les déplacements des sujets pour atteindre chacune des sources sonores virtuelles sont enregistrés (*cf.* figure 4.13).

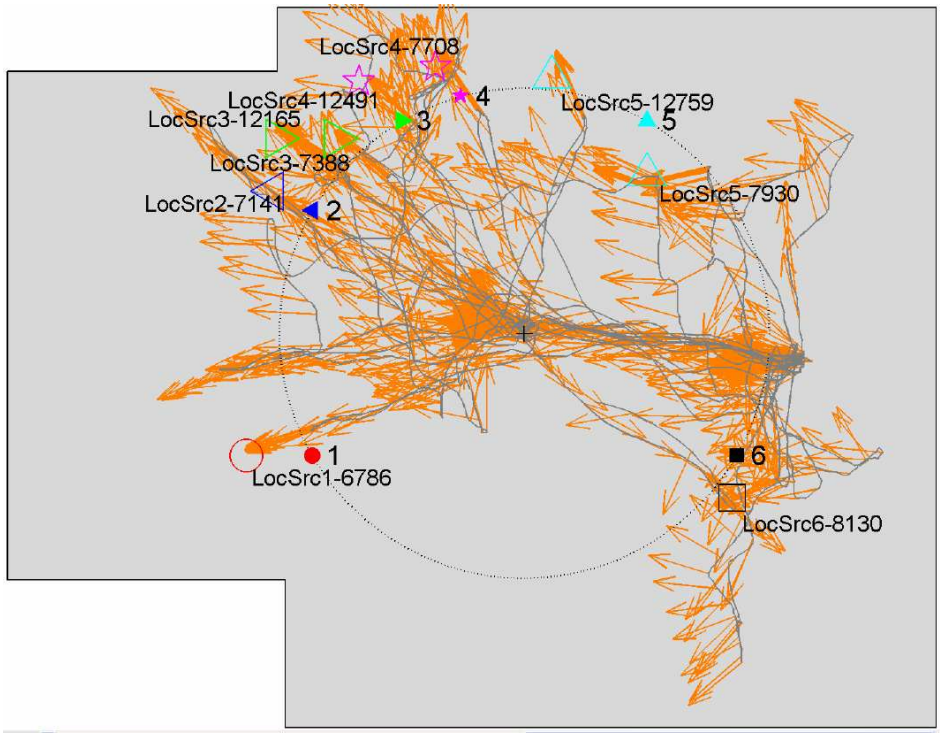


Figure 4.13 – Enregistrement de trajectoires dans l'environnement virtuel auditif *Amandine* (Afonso *et al.*, 2005). Les chiffres représentent les localisations des objets virtuels émettant des signaux sonores spatialisés. Les déplacements et des orientations de la tête des sujets sont enregistrés. Les traits correspondent aux déplacements et les flèches aux orientations de la tête.

Une fois que les sujets ont exploré les éléments de l'environnement sonore virtuel *Amandine*, il leur est demandé d'indiquer la direction de chaque source sonore virtuelle en les pointant du doigt. Un groupe de contrôle se fait décrire la pièce verbalement et doit ensuite indiquer les directions des éléments. Les résultats montrent que les sujets aveugles construisent des représentations spatiales plus précises lorsque les éléments auditifs sont spatialisés que lorsqu'ils sont décrits verbalement. De la même manière que l'environnement *Egosound* de Sedes *et al.* (2003) ou *Ambisonic* de Frauenberger et Noisternig (2003), *Amandine* permet la construction de représentations spatiales s'inscrivant dans un référentiel de type égocentré. Afonso *et al.* (2005) soulignent que les résultats témoignent de l'intérêt d'une exploration active impliquant des déplacements pour la découverte d'environnements.

- Une application d'entraînement à la régate sonore virtuelle pour les aveugles

Begault (1994) rappelle que la simulation sonore d'environnements extérieurs nécessite de prendre en compte leurs composantes naturelles et notamment la présence du vent. Une étude de Gill (1984) montre qu'un vent de face ou de dos change les perceptions de l'environnement. En Italie, Alessandro

Gaosso dirige une association (*Homerus*[ε]) qui propose à des personnes aveugles de naviguer sur le lac de Garde depuis 1995. Dans ce cadre, il a fait développer une application pour permettre aux régatiers aveugles de s'entraîner au *match-racing* (régate duelle) par simulation. Sur le plan d'eau réel, les deux voiliers sont sonorisés, ainsi que les trois bouées du parcours. En situation virtuelle, les sujets doivent interpréter les azimuts des bouées, de l'autre voilier et du vent grâce à un système de spatialisation des différents sons. Les distances sont traduites par les intensités des sons. Les régatiers virtuels dirigent donc leur voilier avec les flèches du clavier et réalisent le parcours contre un autre voilier (*cf.* figure 4.14).

Puisqu'il n'existe pas de publications proposant une validation ou une analyse quantitative des transferts d'apprentissage entre l'application *Homerus* et les situations réelles, nous avons réalisé un test succinct de transfert depuis le réel vers le virtuel. Pour ce faire, deux sujets aveugles pratiquant le *match-racing* sonore en rade de Brest se sont livrés à des régates virtuelles avec l'application de l'association *Homerus*. Les résultats montrent que ces derniers parviennent relativement facilement à percevoir les azimuts des bouées et du vent et arrivent ainsi à réaliser le parcours. Le transfert semble donc fonctionner depuis le réel vers le virtuel. Cependant les deux sujets déclarent ne pas réussir à estimer leur position relative au parcours en raison de difficulté à percevoir les distances et les vitesses.

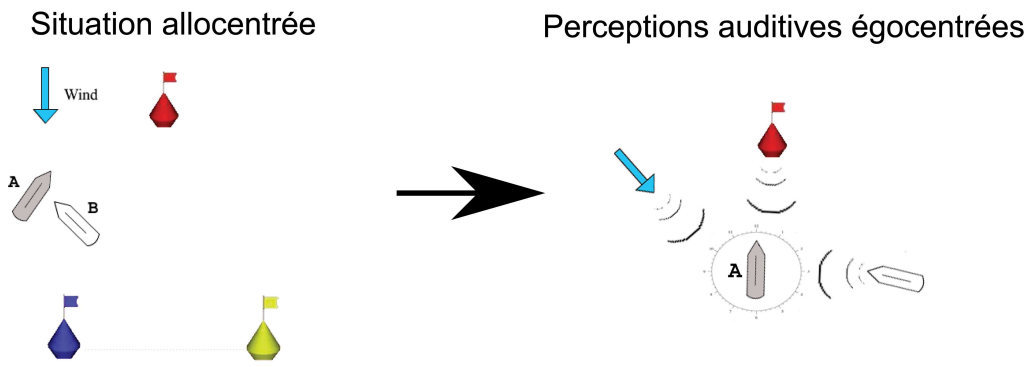


Figure 4.14 – L'application d'entraînement au match-racing sonore virtuel de l'association *Homerus*. La vignette de gauche illustre la situation de navigation dans un référentiel spatial de type allocentré. Nous constatons que les voiliers sont en train de remonter au vent à gauche du parcours et qu'il y a « une route-collision » avec le voilier B. La vignette de droite représente les perceptions auditives générées par l'application pour un utilisateur embarqué à bord du voilier A. Ainsi, dans un référentiel de type égocentré, l'utilisateur perçoit le vent à un azimut de dix heures, la bouées au vent à midi et demi et l'autre voilier (B) à un azimut de trois heures. La constance de l'azimut du voilier B à trois heures informe l'utilisateur de la future collision.

Finalement, il semble que les environnements virtuels auditifs présentent un potentiel pour l'éla-

[ε] www.homerus.it

boration de représentations spatiales non visuelles s'incrivant systématiquement dans un référentiel de type égocentré.

4.3.2 Les environnements virtuels haptiques

En absence de vision, la modalité haptique permet également d'appréhender l'espace. Nous allons voir que malgré sa nature séquentielle et égocentrée, la modalité haptique témoigne d'un potentiel à permettre la construction de représentations spatiales s'inscrivant dans un référentiel de type allocentré.

4.3.2.1 Les principes du rendu haptique

L'objectif poursuivi par l'utilisation d'une interface haptique peut être la constitution d'une expérience spatiale sensible. Ainsi, l'outil de retour de force est au centre d'un processus de perception-action (*cf.* figure 4.15).

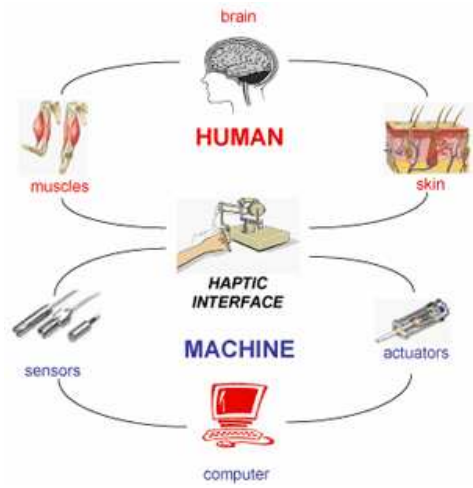


Figure 4.15 – Effecteurs et récepteurs sensoriels du processus perception-action mis en œuvre lors de l'utilisation d'une interface haptique dans un environnement virtuel. Les effecteurs de l'utilisateur (« *human* ») sont les muscles alors que ceux de l'interface haptique (« *machine* ») sont les moteurs électriques (« *actuators* »). Les récepteurs de l'utilisateur sont les organes cutanés (« *skin* ») composés des récepteurs de Merkel (pression lente), Meismer (pression rapide), Ruffini (étirement) et Pacini (vibration). Les récepteurs de l'interface haptique sont des potentiomètres (« *sensors* ») permettant la capture des positions dans les trois dimensions pour une interface haptique à six degrés de liberté.

L'utilisateur interagit avec l'interface suivant le principe de l'action-réaction entre l'interface et le programme. Ainsi les forces appliquées par l'utilisateur sur l'interface à un moment donné déclenchent la génération de force par le programme *via* l'interface selon une position et un instant précis. C'est ce que Salisbury *et al.* (2004) appellent le processus de la « *boucle fermée* » (*cf.* figure 4.16).

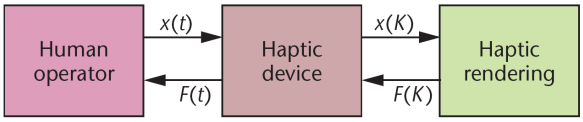


Figure 4.16 – La « *boucle fermée* » de Salisbury *et al.* (2004). x(t) et F(t) sont les positions et les forces échangées en permanence entre l'utilisateur et l'interface. x(K) et F(K) sont les signaux de positions et de forces permettant la communication entre l'interface et le programme de l'environnement virtuel.

Ce processus d'interaction en temps réel permet l'immersion de l'utilisateur dans un environnement virtuel haptique. Lors de la navigation manuelle dans cet environnement, l'utilisateur peut intéragir avec l'interface haptique sous forme de *contacts* ou de *contraintes*.

- Les contacts

Les contacts entraînent la génération de forces qui s'opposent aux déplacements de l'utilisateur. Elles sont déclenchées par une collision entre la position réelle du curseur haptique et la position virtuelle d'objets contenus dans la base de données du programme (*cf.* figure 4.17). Basdogan et Srinivasan (2002) précisent que la mise à jour des collisions doit être effectuée à une fréquence de mille hertz afin de fournir un rendu haptique cohérent.

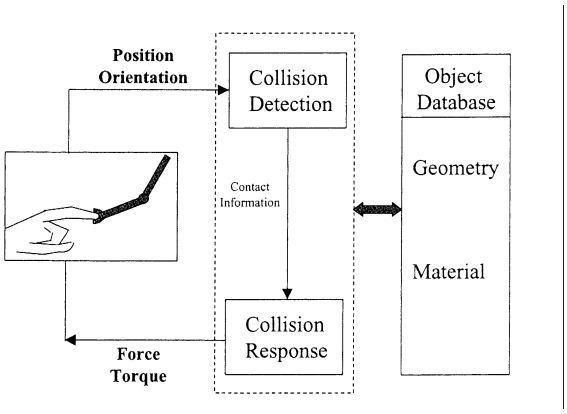


Figure 4.17 – La détection de collision (Basdogan et Srinivasan, 2002).

Lorsque l'interface haptique ne comporte qu'un seul point de contact avec l'environnement virtuel, ce point est appelé point d'interaction haptique (HIP). Dans l'exemple du contact avec une sphère haptique, lorsque le curseur entre en contact avec la sphère, le HIP est soumis à une force répulsive comme sur la figure 4.18.

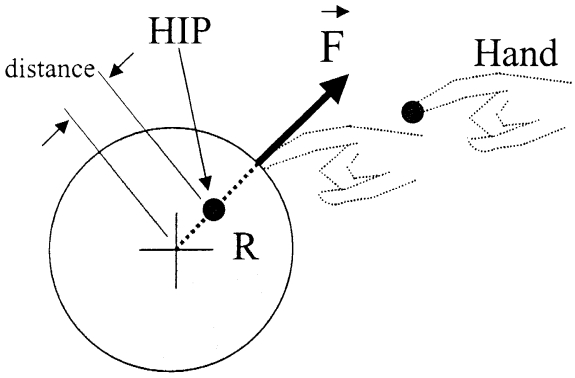


Figure 4.18 – Contact haptique avec une sphère (Basdogan et Srinivasan, 2002). Dans ce cas, la force (F) exercée sur le point d'interaction haptique (HIP) est fonction de la distance entre le curseur et le centre de la sphère.

Les interactions haptiques de type contact sont les plus utilisées Elles permettent de ressentir le monde haptique virtuel de façon tangible. Par exemple, le suivi des contours d'une forme géométrique utilise ce type d'interaction.

- Les contraintes

Dans le domaine haptique, les contraintes sont les forces qui attirent le curseur en un point précis (*cf.* figure 4.19).

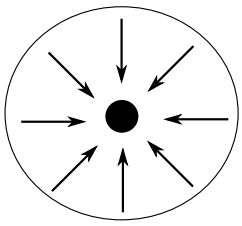


Figure 4.19 – Champ attracteur. Lorsque le curseur haptique se trouve dans le périmètre du champ attracteur (cercle blanc), une force (flèches) dirigée vers le centre du champ attracteur lui est appliquée.

Les interactions haptiques de type contrainte sont généralement utilisées dans les dispositifs de « réalité augmentée », c'est-à-dire lors d'ajouts de sensations qui ne sont pas toujours perceptibles dans la réalité. Par exemple, la force d'attraction entre un ion et un nuage d'électrons peut être ressentie grâce à un champ attracteur. Par ailleurs, il est possible d'utiliser des interactions de type contrainte pour guider la main lors de l'apprentissage de l'écriture (Bluteau *et al.*, 2008) ou encore pour aider un aveugle à trouver un objet dans un environnement virtuel.

4.3.2.2 Les interfaces haptiques

- Les interfaces haptiques classiques

Biggs et Srinivasan (2002) définissent les interfaces haptiques comme des mécanismes permettant à leurs utilisateurs de toucher, ressentir et manipuler des objets simulés au sein d'environnements virtuels. Pour ces auteurs, les interfaces passives (claviers, souris) captent les actions de l'utilisateur mais ne produisent par de retours tactilo-kinesthésiques.

A l'inverse, les interfaces actives produisent des retours de force. Un retour de force est une résistance tangible perçue au moyen de la modalité haptique (Vitense *et al.*, 2002). Ces feedbacks sont engendrés par des petits moteurs. Casiez (2004) explique que les retours haptiques sont principalement générés par des moteurs électriques à courant continu pour des raisons économiques et pratiques.

Les interfaces haptiques actives les plus simples proposent des mouvements selon deux degrés de liberté, c'est-à-dire que les mouvements de l'utilisateur sont contraints de rester dans un seul plan (*cf.* figure 4.20).

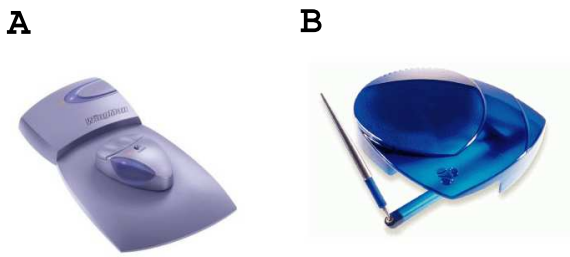


Figure 4.20 – Le *PencatPro* (A) d'Immersion (*www.immersion.com*) et la *Wingman* (B) de Logitech (*www.logitech.com*) sont des interfaces haptiques actives offrant à l'utilisateur deux degrés de liberté.

Ensuite, les bras à retour de force offrent des possibilités de mouvement suivant 6 degrés de liberté, c'est-à-dire que les utilisateurs peuvent effectuer des déplacements manuels dans les trois plans de l'espace. Ces interfaces sont les plus démocratisées pour leur rapport qualité-prix. (*cf.* figure 4.21).

Figure 4.21 – Le *Phantom Omni* (A) de Sensable (*www.sensable.com*), le *Virtuose* (B) d'Haption (*www.haption.com*) et le *Delta* (C) de Force Dimension (*www.forcedimension.com*) sont des interfaces haptiques actives offrant à l'utilisateur six degrés de liberté.

Parmi les interfaces haptiques, il existe également des dispositifs à câbles. Ici, un ou plusieurs doigts sont chacun retenus par trois câbles. Leurs blocages respectifs engendrent des sensations haptiques. Ils permettent des mouvements suivant 6 degrés de liberté et présentent l'intérêt d'apporter des retours de force aux deux mains et à plusieurs doigts simultanément. Cependant il semble que les caractères fragile et intrusif de ce système limite sa démocratisation (*cf.* figure 4.22).

Figure 4.22 – Le *SPIDAR* (Space Interface Device for Artificial Reality) se compose de câble et de moteurs les retenant. Ce dispositif permet la gestion des deux mains et de quatre doigts.

Il existe également des gants haptiques à l'architecture « exosquelettique ». Les mécanismes de retour de force sont extérieurs à la main et permettent ainsi une grande liberté de mouvement. Pour ressentir le poids des objets il faut y ajouter un bras à retour de force. Ce dispositif est très peu répandu du fait de son coût et de sa complexité (*cf.* figure 4.23).

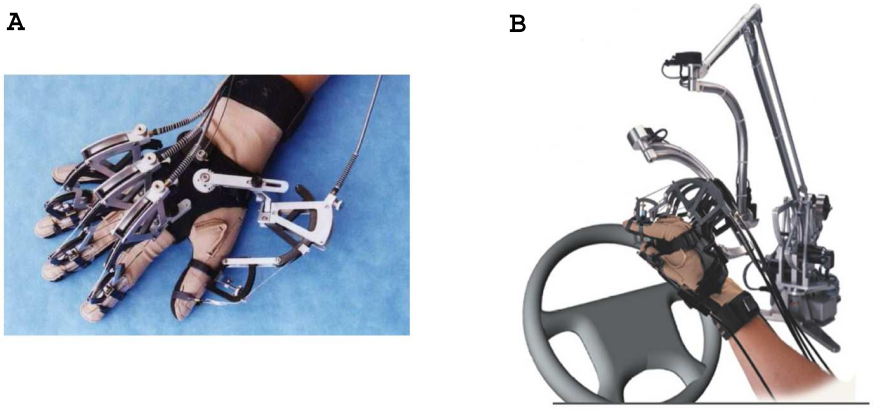


Figure 4.23 – Le *Cybergrasp* (A) de chez Immersion permet une grande liberté de mouvement. Pour pouvoir ressentir le poids des objets, il faut y ajouter le *Cyberforce* (B)

Les interfaces haptiques présentées dans le panel ci-dessus sont souvent utilisées dans des environnements multimodaux associant la vision et les retours de force. Des domaines d'application tels que la simulation d'interventions médicales (Astley et Hayward, 2000), ou encore l'apprentissage de manipulations industrielles (Hosseini *et al.*, 2002) y trouvent un grand intérêt. Ces interfaces ne répondent donc pas spécifiquement aux besoins d'un public non-voyant.

- Les interfaces haptiques et l'absence de vision

Les interfaces haptiques « classiques » peuvent néanmoins être utilisées par les aveugles. Ainsi, Jansson *et al.* (2000) en comparent deux : le *Phantom 1.5A* et le *Impulse Engine 3000*. Les auteurs demandent aux sujets aveugles ou les yeux bandées de distinguer différentes textures et formes géométriques. Les résultats montrent que les textures sont particulièrement bien perçues au moyen des deux outils. Les formes géométriques simples sont également facilement reconnues. Les auteurs soulignent néanmoins que les formes virtuelles plus complexes semblent moins bien perçues avec les deux interfaces. Pour Jansson *et al.* (2000), le fait qu'il n'existe qu'un seul point de contact entre l'environnement et la main du sujet limite la globalité des procédures d'exploration.

Depuis la mise en place du projet européen *GRAB*© (*Computer GRAphics access for Blind people through a haptic virtual environment*) en 2000, les laboratoires de recherche et de développement Labein et Percro en partenariat avec le Conseil National des Aveugles d'Irlande (*NCBI*), l'Institut Royal National des Aveugles d'Angleterre (*RNIB*) et l'Organisation Nationale des Aveugles d'Espagne (*ONCE*) ont travaillé à la conception d'une interface haptique dédiée aux personnes aveugles (*cf.* figure 4.24).

©www.grab-eu.co

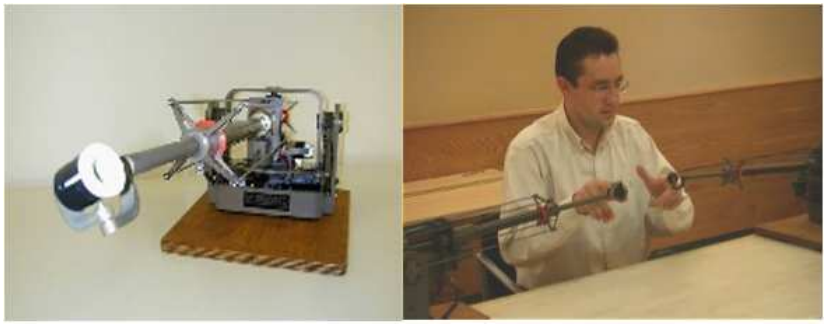


Figure 4.24 – L'interface haptique dédiée aux aveugles issue du projet européen GRAB (Avizzano *et al.*, 2003). L'utilisation des deux mains permet de toucher simultanément différents éléments des environnements virtuels.

Lors de l'évaluation de ce nouvel outil, Avizzano *et al.* (2003) concluent que cette interface haptique est supérieure aux autres car elle permet l'utilisation de deux doigts dans un grand espace commun et offre ainsi aux personnes aveugles la possibilité d'utiliser des stratégies d'exploration haptique plus proches de celles employées dans la réalité. Cependant Teresa Gutierrez, responsable du projet GRAB au laboratoire *Labein* admet que cet outil reste à l'état de prototype et n'a pas donné lieu à une commercialisation permettant sa démocratisation.

En bref, bien que de nombreuses interfaces haptiques existent. Le *phantom* reste l'outil le plus utilisé pour les environnements virtuels adaptés aux aveugles.

4.3.2.3 Les environnements haptiques adaptés aux aveugles

En général, les environnements virtuels destinés aux aveugles font intervenir la modalité auditive avec la modalité haptique. Aussi la plupart des applications présentées ci-après respectent cette règle.

- Un environnement virtuel haptique cartographique

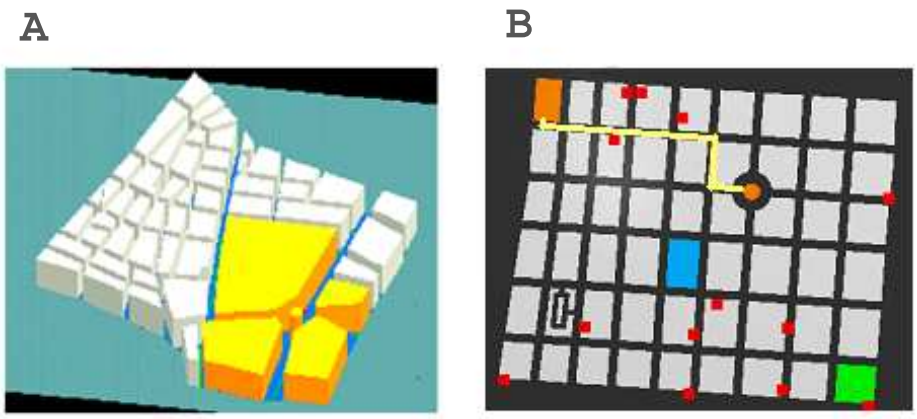


Figure 4.25 – GRAB (Gutierrez, 2004). La figure A représente la ville en relief de l'environnement haptique et auditif « *Virtual City Maps* ». La figure B illustre la carte du quartier de Madrid utilisée pour l'évaluation de « *Virtual City Maps* » (Gutierrez, 2004). Les rectangles de couleurs différentes correspondent à des bâtiments précis. Les points rouges sont des points d'intérêts spécifiques. Le trajet jaune correspond à un itinéraire créé par un sujet.

Au cours du projet *GRAB*, dont nous avons présenté l'interface haptique à deux doigts au paragraphe 4.3.2.2, Gutierrez (2004) a conçu et évalué l'application « *Virtual City Maps* ». Son objectif est de permettre aux personnes déficientes visuelles de préparer leurs itinéraires et de découvrir différents lieux d'une ville sans courir les risques inhérents à la locomotion en situation de cécité. Cet environnement haptique et auditif est dessiné à partir de véritables données géographiques. Dans un souci d'éviter l'encombrement de la carte, ce monde virtuel ne propose que des informations concernant les rues, les bâtiments et d'éventuels points d'intérêt. Cependant, l'auteur précise qu'il est possible d'ajouter toutes sortes de couches d'information telles que des administrations ou des magasins par exemple. Dans cet environnement les sujets utilisent l'interface haptique à deux doigts pour explorer le plan de la ville dans les trois dimensions (*cf.* figure 4.25.A). Les informations auditives sont déclenchées automatiquement lorsqu'un des deux curseurs haptiques entre en contact avec un élément nommé. Douze sujets handicapés visuels, dont sept aveugles de naissance et trois aveugles tardifs se livrent à une expérimentation. Sur une carte d'un quartier de Madrid (*cf.* figure 4.25.B), la tâche consiste à explorer la carte, trouver et explorer une rue et décrire sa configuration (forme, orientation, croisement), trouver un point d'intérêt et créer une route entre ces deux points. Chaque étape donne lieu à une description.

Les résultats n'ont pas été analysés quantitativement. Cependant, Gutierrez (2004) souligne que tous les sujets ont réussi à réaliser les différentes tâches sus-citées. Par ailleurs, ils ont répondu à des questionnaires comportant une échelle d'appréciation croissante composée de cinq items sur différents aspects de l'application. Il semble donc que cette application soit facile à utiliser, peu fatigante et même ludique. Par ailleurs, exceptée une personne peu familière des cartes qui ne pense pas que l'on

puisse apprendre un itinéraire avec cette application, les autres déclarent apprendre « beaucoup ». Cependant, s'orienter dans ce monde semble moins facile. En effet, trois personnes se sentent « perdues » et neuf personnes pensent s'être « bien orientées » mais aucun n'estiment s'être « très bien orientée ».

Finalement, il semble que les cartes haptiques et auditives de l'application « *Virtual City Maps* » présentent un potentiel important pour la consultation d'informations géographiques et la préparation d'itinéraire des personnes non-voyantes. Les déclarations des sujets quant à leur désorientation dans l'environnement virtuel constituent une piste pour travailler sur les types de référentiels spatiaux impliqués au cours des navigations en environnement virtuel haptique et auditif.

Dans cet objectif, Gutierrez (2004) propose différents modes de navigation :

→ Le mode « **grille virtuelle** », dont les colonnes correspondent à des lettres et les lignes à des chiffres, fournit des repères s'inscrivant dans un référentiel de type allocentré. Lorsque les sujets activent ce mode, le plan de la ville disparaît et une grille haptique apparaît. Les utilisateurs peuvent alors consulter la liste des rues contenues par chacune des cellules.

→ Le mode « **rue** » permet de suivre le trajet d'une rue. Dans ce mode les mouvements des sujets sont contraints de rester dans la rue dans laquelle se trouve le curseur. Ainsi, les utilisateurs peuvent explorer librement la forme de la rue sans craindre de la perdre. Autrement dit, cette stratégie permet de se concentrer sur l'encodage de la forme de la rue à partir du trajet de la main, soit dans un référentiel de type égocentré.

→ Le mode « **point d'intérêt** » permet à l'utilisateur de se faire guider activement par le curseur vers un point choisi dans une liste. Ce champ attracteur permet d'éviter de mettre en œuvre de longues et fastidieuses stratégies de recherche. Grâce à ce mode, les points d'intérêt peuvent plus facilement devenir des points de référence. Ce mode favorise donc la mise en œuvre d'une stratégie s'incrivant dans un référentiel de type allocentré.

Finalement, cet environnement contient des points de référence (e.g. noms des bâtiments), des repères géométriques (e.g. grille) et des modes de guidage (e.g. rue, point d'intérêt). Ainsi, il semble que les utilisateurs soient en mesure de mettre en œuvre des stratégies d'exploration haptiques égo- et allocentrés.

- Un environnement virtuel haptique à la première personne

Les travaux de Gutierrez (2004) sur « *Virtual City Maps* » posent la question du transfert d'apprentissage entre la navigation virtuelle haptique et auditive, et la navigation réelle des aveugles. En effet, ces deux types de navigation diffèrent essentiellement sur deux points : l'échelle et le type de référentiel spatial. La plupart des applications cartographiques sont à petite échelle (e.g. 1 : 250) et se situent dans un référentiel spatial de type allocentré. A l'inverse la navigation réelle se déroule

nécessairement à grande échelle (1 : 1) et dans un référentiel de type égocentré. Afin de rapprocher les deux mondes, Magnusson et Rassmus-Gröhn (2004) conçoivent un environnement de trafic virtuel (« *Dynamic Haptic-Audio Traffic Environment* ») à grande échelle et s'inscrivant dans un référentiel spatial de type égocentré (*cf.* figure 4.26.A).

Cet environnement adapté à la cécité utilise une interface haptique de type *Phantom Omni* et un système de sonorisation au moyen d'écouteurs stéréophoniques. Représentant un quartier de Lund en Suède, le monde virtuel de « *Dynamic Haptic-Audio Traffic Environment* » contient près de cinq cent objets statiques tels que des arbres et des bâtiments, et plus d'une trentaine d'éléments dynamiques tels que des voitures et des vélos. Les formes haptiques de ces éléments sont des rectangles (*cf.* figure 4.26.B).

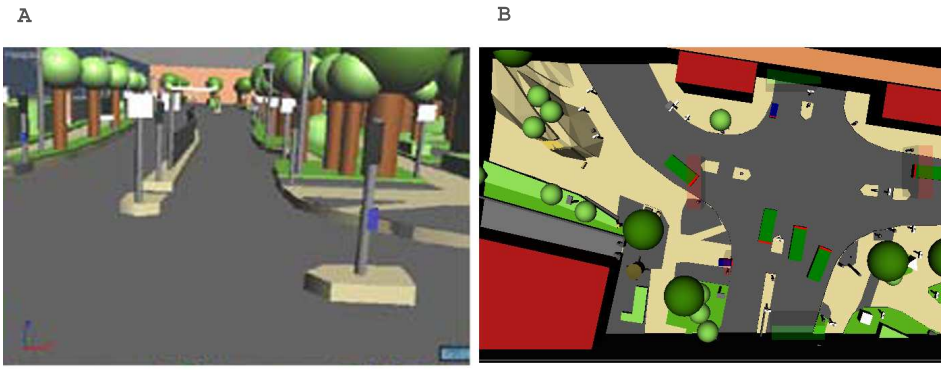


Figure 4.26 – L'environnement dynamique haptique et auditif de trafic virtuel (« *Dynamic Haptic-Audio Traffic Environment* ») (Magnusson et Rassmus-Gröhn, 2004). La figure A montre une vue haptique à grande échelle et s'inscrivant dans un référentiel de type égocentré. La figure B représente un plan aérien de l'application « *Dynamic Haptic-Audio Traffic Environment* » comportant des éléments dynamiques (Magnusson et Rassmus-Gröhn, 2004). Les grands rectangles verts sont les voitures et les petits rectangles bleus sont les vélos. Les rendus haptiques de ces éléments se résument à des parallépipèdes. Par contre, lorsqu'un de ces éléments entre en collision avec l'avatar des sons de moteur ou de sonnette sont déclenchés.

Afin d'évaluer les transferts d'apprentissage entre les navigations dans les environnements virtuel et réel, les auteurs conçoivent un test soumettant huit sujets aveugles aux trois tâches suivantes.

→ Tout d'abord, au cours d'une recherche de « trésors », les sujets se familiarisent avec l'application. L'expérimentateur les guide et les conseille régulièrement sur la manière d'utiliser l'application afin que tous les sujets disposent d'une connaissance comparable de l'application.

→ Ensuite, l'expérimentateur demande aux sujets de préparer un itinéraire depuis un arrêt de bus vers une salle de concert. Les sujets doivent alors décrire verbalement leur trajet en vue de la réalisation de celui-ci dans l'environnement physique.

→ Finalement, il est demandé aux sujets de réaliser cet itinéraire dans la ville. Ils partent donc de l'arrêt de bus pour se rendre à la salle de concert. Ils connaissent la direction du nord et sont munis de leur canne. L'expérimentateur suit chaque sujet en restant quelques pas en arrière afin de pouvoir intervenir en cas de réel danger d'une part, et pour évaluer l'itinéraire d'autre part.

Les résultats montrent que tous les sujets ont réussi à réaliser les trois tâches décrites précédemment. Les auteurs précisent que dans la tâche 3, deux sujets sont « sortis » de l'itinéraire qu'ils avaient préparé au cours de la tâche 2. Cependant, ils ont rapidement retrouvé leur route alors que l'expérimentateur les a uniquement informé qu'ils quittaient l'itinéraire préparé. Les auteurs concluent donc qu'il existe un réel transfert d'apprentissage entre les mondes virtuel et réel. Par ailleurs, grâce à l'enregistrement des activités exploratoires des sujets, Magnusson et Rassmus-Gröhn (2004) dégagent deux principales stratégies d'exploration mises en œuvre dans l'environnement virtuel. Certains sujets sollicitent constamment les informations auditives alors que d'autres explorent le monde avec l'interface haptique avant de vérifier quelques points de repères avec les annonces auditives. Les auteurs notent que les sujets dont le profil d'exploration semble auditif suggèrent une spatialisation continue du son en cours de navigation. En effet, cette inscription de la sonification dans un référentiel de type égocentré rendrait d'autant plus similaires les perceptions virtuelles et réelles. Finalement, les auteurs soulignent la métaphore évidente entre une interface haptique de type *Phantom* et une canne blanche. Plus précisément, les sujets les plus habiles lors de l'utilisation de la canne sont ceux qui présentent les meilleurs résultats de transfert d'apprentissage. Il semble donc que la coordination des informations de type égocentré tels que les mouvements d'exploration de la canne d'une part, et d'informations de type allocentré telle que la fixation de points de référence au moyen d'annonces vocales d'autres part, permettent la construction d'un espace mental associant des représentations de types égo et allocentrés.

- Un environnement haptique pour l'analyse des stratégies d'exploration

Dans l'objectif d'analyser les stratégies favorisant les transferts d'apprentissage depuis le virtuel vers le réel, Lahav et Mioduser (2008) utilisent un environnement virtuel haptique et auditif représentant une pièce contenant différents meubles (*cf.* figure 4.27).

Trente et un sujets aveugles de naissance et tardifs reçoivent la consigne d'explorer la pièce afin d'être en mesure de la décrire. Un groupe expérimental explore l'environnement virtuel et un groupe de contrôle inspecte la pièce réelle. Les mouvements d'exploration sont enregistrés. Parmi les différentes évaluations, il est demandé aux sujets de reproduire la pièce sur une maquette, de décrire les relations de distance et de direction entre les objets et d'atteindre des objets dans la pièce réelle après désorientation. Les auteurs interprètent les résultats en fonction des *patterns* d'exploration.

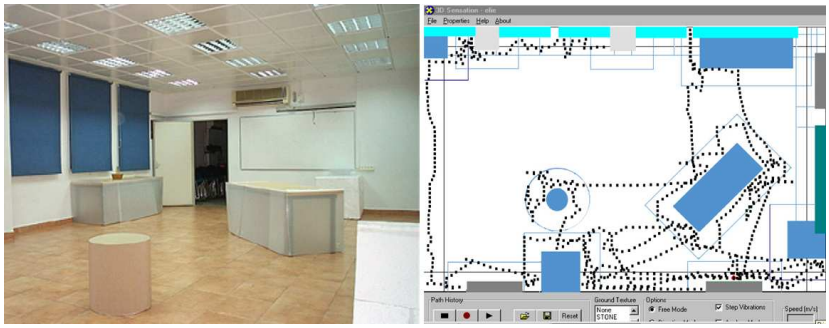


Figure 4.27 – Environnements réel et virtuel de Lahav et Mioduser (2008). A gauche se trouve la salle de classe bien réelle. A droite se trouve l'environnement virtuel haptique et auditif. Les traits en pointillés représentent une séquence d'exploration haptique.

Tout d'abord, les auteurs ne trouvent aucune différence entre les explorations des aveugles de naissance et des aveugles tardifs. Ensuite, au regard des fréquences d'utilisation de chaque stratégie, il n'existe pas non plus de différence entre le groupe expérimental et celui de contrôle. Ainsi, les auteurs observent les mêmes *patterns* d'exploration que Hill et Rieser (1993), Gaunet et Thinus-Blanc (1996) et Gaunet *et al.* (1997) dans les espaces de manipulation et de locomotion (*cf.* tableau 3.2 p.97). Les stratégies les plus précisément identifiées sont celles du « périmètre » (*cf.* figure 4.28A, stratégie n°1), de la « grille » (*cf.* figure 4.28A, stratégie n°2), « objets-à-objets » (*cf.* figure 4.28A, stratégie n°3) et du « point de référence » (*cf.* figure 4.28A, stratégie n°4). Les résultats révèlent également que la stratégie de la « grille » est la plus utilisée pour découvrir l'environnement virtuel alors qu'il s'agit de celle du « périmètre » pour la découverte de l'environnement réel. Par ailleurs, les auteurs identifient une nouvelle stratégie de balayage qu'ils comparent à celle de l'utilisation d'une longue canne (*cf.* figure 4.28B stratégies n°1 et 2). A la différence de Magnusson et Rassmus-Gröhn (2004) dans l'expérience précédente, Lahav et Mioduser (2008) avancent que ces stratégies ne peuvent être employées que dans les environnements virtuels du fait de leur amplitude et de leur rapidité par rapport aux mouvements d'une canne blanche en situation naturelle. En effet, il semble que tout en simulant l'action de marcher avec une canne tout autour de la pièce virtuelle, malgré les distances, les sujets explorent à la fois les relations entre les différents objets et les relations entre les objets et le périmètre.

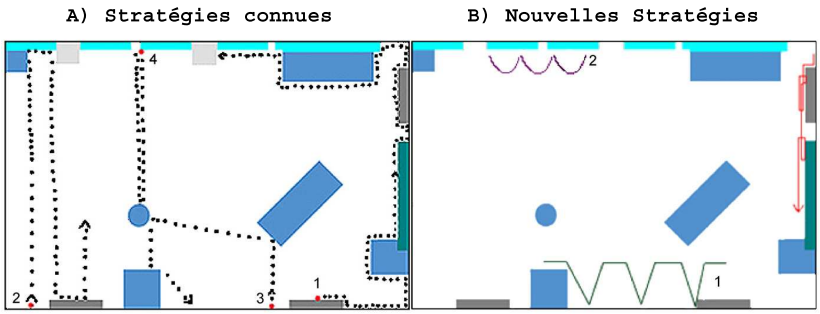


Figure 4.28 – Les stratégies haptiques dans l'environnement virtuel de (Lahav et Mioduser, 2008). Sur la figure A, les stratégies identifiées sont celles du « périmètre » (stratégie n°1), de la « grille » (stratégie n°2), d'« objets-à-objets » (stratégie n°3) et du « point de référence » (stratégie n°4). Les nouvelles stratégies représentées sur la figure B s'apparent aux mouvements d'exploration d'une longue canne blanche. Pour les auteurs, cette stratégie est spécifique aux environnements virtuels haptiques du fait de l'amplitude et de la rapidité des mouvements.

Les résultats issus de la reproduction de la configuration de la pièce au moyen d'une maquette montrent que les sujets du groupe expérimental placent les sept objets de façon plus précises que les sujets du groupe de contrôle qui n'en positionnent souvent que six. Par ailleurs, d'après les auteurs, l'analyse des descriptions de la pièce montre que les sujets du groupe expérimental utilisent plus de références externes que les sujets du groupe de contrôle. De plus, les estimations de direction des différents objets et les atteintes de ceux-ci dans l'environnement réel sont réalisés plus précisément par les sujets du groupe de contrôle. Les sujets qui utilisent l'environnement virtuel haptique et auditif de Lahav et Mioduser (2008) construisent donc des représentations spatiales plus précises et s'inscrivant plus facilement dans un référentiel de type allocentré que ceux qui explorent l'environnement réel. Les auteurs remarquent d'ailleurs que les sujets du groupe expérimental qui utilisent le plus de stratégies de type allocentré réalisent les meilleures performances.

Finalement, Lahav et Mioduser (2008) insistent sur l'importance de ces résultats en terme de transfert d'apprentissage depuis le virtuel vers le réel. En effet, les sujets n'ayant exploré que l'environnement virtuel semblent réaliser de meilleures performances dans l'environnement réel que les sujets l'ayant déjà visité. Autrement dit, les sujets ayant consulté une « vue aérienne haptique » parviennent à réinvestir efficacement leurs connaissances depuis « leur propre point de vue » en situation naturelle.

En bref, si l'on applique le modèle de coordination des référentiels spatiaux en situation de cécité de Thinus-Blanc et Gaunet (1997) aux environnements virtuels, il semble que les schémas (allocentrés) et les règles d'encodage (égocentrées) sollicités lors de l'acquisition des informations en environnement virtuel, permettent la construction de représentations de types route et carte se coordonnant lors de

la phase d'utilisation des connaissances en environnement réel (*cf.* § 3.10 p.100).

Il semble donc que la réalité virtuelle ait le potentiel de fournir de nouveaux outils pour la construction des représentations spatiales des personnes non-voyantes. Ces nouveaux outils favorisent le développement de nouvelles stratégies. Le *pattern* d'exploration « mixte », comme celui de la « longue canne blanche virtuelle », permettant d'intégrer quasiment simultanément des référence internes et externes est particulièrement encourageant. De nouvelles applications avec de nouvelles fonctionnalités pourraient-elles offrir aux aveugles les moyens de coordonner plus facilement des sortes de « points de vue » de types et égo et allo-centrés ?

4.3.3 Conclusion sur la cécité dans les environnements virtuels de navigation

La spatialisation du son et la vocalisation des informations sont les principaux apports des interfaces auditives. De nombreux environnements virtuels auditifs montrent que les transferts d'apprentissages sont envisageables. Les environnements haptiques sont généralement pourvu de système sonore. Ici également, les études semblent converger vers l'existence de transfert d'apprentissage vers des situations naturelles. L'efficacité de ces transferts ne semble pas tributaire de l'expérience visuelle, mais dépend tout particulièrement des stratégies d'exploration haptique mises en œuvre. Tout se passe comme si, de la même manière que dans les études se déroulant en environnement réel, l'élaboration de représentations spatiales s'inscrivant dans les différents types de référentiel spatiaux jouait un rôle prépondérant.

4.4 Synthèse sur la réalité virtuelle et la navigation

La réalité virtuelle semble présenter des intérêts majeurs pour la navigation des aveugles. Tout d'abord, l'appropriation des interfaces par les utilisateurs joue un rôle primordial pour l'immersion au sein d'un environnement virtuel. Par ailleurs, le contrôle des paramètres expérimentaux dans des contextes proches des situations naturelles se trouve favorisé. Ensuite, les enjeux des navigations virtuelles montrent comment les différentes possibilités de présentation des informations en environnements virtuels participent à la coordination des référentiels spatiaux et aux transferts des connaissances vers des situations naturelles. Finalement, les interfaces auditives et haptiques se révèlent être les moyens privilégiés des aveugles pour interagir avec les environnements virtuels de navigation. Lors des activités des sujets dans ces environnements, les *patterns* d'exploration observés rappellent précisément ceux des stratégies haptiques et locomotrices s'inscrivant dans les référentiels égo- et allocentrés. De plus, certaines études témoignent de transferts d'apprentissage depuis les environnements virtuels

haptiques et auditifs vers des navigations bien réelles. Ainsi, les environnements virtuels de navigation haptiques et auditifs se révèlent aussi efficaces pour proposer aux aveugles des entraînements à la navigation que pour approfondir nos connaissances sur les mécanismes de navigation en situation de cécité.

Conclusion de la revue de littérature

Étudier dans quelle mesure un dispositif de réalité virtuelle peut aider les aveugles à s'orienter dans l'espace nécessite de connaître les besoins essentiels de ces personnes. Pour repérer ces besoins nous devions analyser les différents aspects du concept d'espace. Il nous est apparu important de distinguer l'espace proche et l'espace distant car les moyens d'exploration sont différents. La question de la structuration mentale de l'espace nous a conduit à concevoir, au delà des divergences théoriques, cette représentation comme le résultat d'une interaction entre l'action du sujet et son environnement. Cette interaction provoque des processus descendants d'assimilation du nouveau aux structures déjà construites, et d'accommodation des dites structures. Ces décentrations successives permettent de passer du système de référence entièrement égocentré à des coordinations entre représentations de types égo et allocentrés. Dans cette évolution, il apparaît que les cartes géographiques, en tant qu'outil psychologique, jouent un rôle important. D'autre part, en cours de navigation, l'actualisation des informations se révèle prépondérante. Ces mécanismes communs à tous les humains prennent un caractère particulier chez les aveugles. Si les raisonnements sur l'espace semblent identiques à ceux des voyants, l'absence de vision limite les perceptions spatiales et augmente les difficultés à actualiser les positions relatives à l'environnement au cours des déplacements. Les stratégies d'exploration de l'environnement sont similaires dans les petits espaces de manipulation et dans les grands espaces de navigation. Cela nous amène à penser que des transferts d'apprentissage d'un espace à l'autre sont possibles. Par ailleurs, les stratégies d'exploration de type allocentré se révèlent plus efficaces que les stratégies de type égocentré. De nombreuses études montrent que les cartes en relief sont d'un accès facile pour les aveugles. Toutefois, ces cartes ne permettent pas de s'entraîner à actualiser les informations en cours de navigation. Seules des cartes interactives pourraient le faire. Nous pensons qu'un outil de réalité virtuelle suffisamment élaboré pour provoquer des sensations d'immersion serait en mesure de répondre à ces problèmes. L'étude d'un tel outil dans le cadre de la navigation maritime à la voile pourrait apporter des éléments de réponse.

Deuxième partie

Expérimentation

Chapitre 5

SeaTouch

Les marins aveugles sont en mesure de barrer un voilier grâce à l'association des sensations d'inclinaison du bateau, du bruit des voiles qui battent et des vibrations dûes aux écoulements de l'eau sur la coque (Simonnet, 2002).

De plus, sur un parcours muni de bouées sonores, les régatiers non-voyants sont capables de réaliser des itinéraires à la voile de façon autonome. Dans cette situation, une carte en relief représentant le parcours en fonction du vent permet aux sujets de construire une représentation de la trajectoire réalisée (Simonnet, 2004; Simonnet *et al.*, 2005). Cependant les précisions de ces actions et représentations restent faibles.

Par ailleurs, le logiciel de régate sonore virtuelle « *Homerus*[@] » montre que les marins aveugles parviennent à s'immerger dans ce type de navigation. Cependant les représentations spatiales issues de ces navigations semblent également peu précises (*cf.* § 4.14 p.131).

Alors qu'il existe des environnements virtuels haptiques et auditifs adaptés aux non-voyants pour l'entraînement à la navigation à terre (*cf.* § 4.3.2.3 p.138), aucun ne propose aux aveugles de s'entraîner à la navigation maritime. Nous avons donc mis au point SeaTouch, un logiciel de navigation haptique et auditif pour la préparation d'itinéraire à la voile par les marins non-voyants (Simonnet *et al.*, 2006a,b, 2007b). SeaTouch permet à la fois de déplacer un curseur haptique et un voilier virtuel.

Ce logiciel espère apporter une réponse aux besoins essentiels des marins non-voyants : fournir des cartes marines virtuelles aussi performantes que les cartes en relief et permettre la préparation d'itinéraires et l'actualisation des informations au cours d'un déplacement.

[@] www.homerus.it

5.1 Les cartes virtuelles

Le développement informatique de SeaTouch a été réalisé dans les locaux du C.E.R.V. par les étudiants en formation à l'Ecole Nationale d'Ingénieur de Brest (E.N.I.B.) encadrés par Serge Morvan, professeur d'informatique à l'E.N.I.B.. Le langage JAVA a été retenu pour ses aptitudes à gérer des *objets informatiques* et sa *portabilité* d'un système d'exploitation à l'autre.

Nous précisons que les cartes des côtes françaises de SeaTouch ont été construites à partir des données sources du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (S.H.O.M.). Ainsi, nous transformons des cartes vectorielles de format S57 au format XML grâce au logiciel Handinav également développé au C.E.R.V.. SeaTouch peut donc afficher toute carte de format S57 non protégée. Par exemple, l'intégralité des côtes des Etats-Unis est actuellement disponible *via* internet.

5.1.1 Les cartes haptiques

Figure 5.1 – Le Phantom Omni (à gauche) et l'environnement virtuel maritime de SeaTouch (à droite). La pointe du stylet du Phantom dans l'espace réel dirige le curseur représenté par la sphère blanche au contact de la côte virtuelle.

5.1.1.1 Le choix de l'interface haptique

Plusieurs raisons nous ont conduits à choisir une interface haptique de type Phantom Omni (*cf.* figure 5.1) :

- L'existence de bibliothèques de programmation informatique dans le langage JAVA pour cette interface a permis de réduire le temps du développement.
- Son rapport qualité-prix relativement exceptionnel nous a autorisés à nous procurer plusieurs unités et par conséquent à réaliser des expériences en parallèle de l'avancement du développement.
- Le caractère non intrusif de la tenue « type stylo » présente des facilités d'utilisation par rapport

à un gant par exemple.

- La présence de retour de force autorise le développement de fonctionnalités de recherches guidées telle que celle du voilier par exemple.
- Le plan de travail en trois dimensions permet à la fois l'exploration fine de zones géographiques complexes, et l'évitement de ces zones en les survolant lors d'explorations plus globales ou de recherches guidées par un retour de force.

5.1.1.2 Le rendu haptique

Les cartes de SeaTouch se tiennent dans un plan vertical, c'est-à-dire que le « nord virtuel » se trouve vers le « ciel réel », le sud vers le sol, et l'est et l'ouest respectivement à droite et à gauche de l'utilisateur. Les raisons de ce choix sont ergonomiques :

- L'espace de travail du Phantom Omni est plus grand dans le plan vertical.
- Gentaz et Hatwell (2000) ont montré que l'axe vertical est un axe de référence aisément perceptible grâce à la gravité.
- Si le plan de travail était horizontal, les utilisateurs devraient maintenir leur coude en altitude afin de ne pas gêner leurs mouvements ; cette position se révèle fatiguante et n'est pas adaptée à une longue exploration.

En ce qui concerne les surfaces de la mer et de la terre, elles se différencient par leur texture et leur élévation. En toute logique la mer est lisse et la terre est rugueuse. Par ailleurs, le plan de la terre est élevé d'un centimètre par rapport à celui de la mer. Puisque l'utilisateur travaille dans le plan vertical, une prise d'altitude du curseur dans le monde virtuel nécessite le rapprochement du stylo du Phantom près du corps de l'utilisateur dans le monde réel. Les plans de la surface de la mer et de la terre sont reliés par une surface perpendiculaire représentant la côte. Pour explorer la côte, l'utilisateur positionne donc le curseur au niveau de la mer et au pied de la côte, puis le déplace tout en restant au contact.

Les collisions entre le curseur et les différentes balises (bouées, phares...) donnent lieu au déclenchement de champs attracteurs (*cf.* figure 4.19 p.134). Ainsi, afin de faciliter la détection des balises, quelle que soit l'échelle de la carte virtuelle, le diamètre de la sphère d'attraction correspondant à une balise est d'un centimètre dans l'espace de travail réel du Phantom. Lorsque le curseur est à l'intérieur d'une balise, l'utilisateur doit légèrement forcer vers l'extérieur pour la quitter.

5.1.2 La sonification

Lors des collisions du curseur avec la mer, la terre ou la côte, des sons naturels sont joués. Ces derniers perdurent tant que le contact n'a pas cessé. Ainsi, un clapotis se fait entendre à la surface

de la mer, des cris de moineaux retentissent au contact de la terre et des « piaillements » de goélands apparaissent lors de la rencontre du curseur avec la côte. Par ailleurs, le toucher du sillage du voilier virtuel entraîne un son de bouillonnement d'eau enregistré dans le sillage d'un bateau bien réel (*cf.* figure 5.2).

Outre l'apport d'une information auditive permettant à l'utilisateur d'être informé de façon rapide et intuitive sur la nature des éléments rencontrés, la sonification participe à l'immersion des utilisateurs dans le monde maritime virtuel de SeaTouch (*cf.* § 4.3.1.2 p.124).

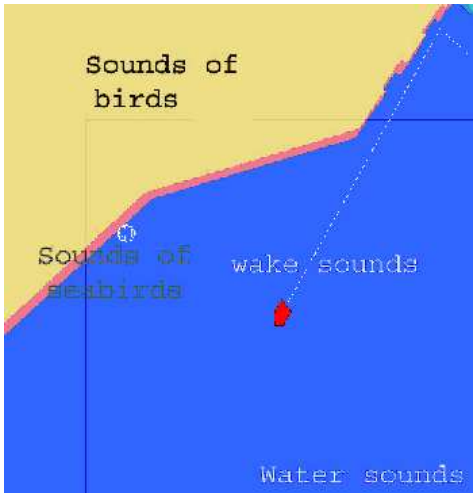


FIGURE 5.2 – La sonification de SeaTouch (Simonnet *et al.*, 2007a). Les contacts avec la mer, la terre, la côte et le sillage du voilier déclenchent respectivement des sons de clapots (« *Water sounds* »), de moineaux (« *Sounds of birds* »), de goélands (« *Sounds of seabirds* ») et de bouillonnement (« *wake Sounds* »).

5.1.3 Les informations et les commandes vocales

5.1.3.1 Les informations vocales relatives aux balises

Lorsque le curseur entre en contact avec le champ attracteur d'une balise, le moteur de synthèse vocale Acapela[B] annonce la nature et le nom de la balise. Par exemple, si l'utilisateur promène le curseur dans le goulet de Brest, il peut potentiellement rencontrer une balise qui lui annoncera : « balise cardinale ouest *Les Fillettes* » au moment où le curseur pénétrera dans le périmètre du champ attracteur de la balise.

[B] www.acapela-group.com

5.1.3.2 Le principe des commandes vocales

Au cours des tests d'utilisation de SeaTouch, nous avons constaté que le nombre de commandes et de touches de raccourcis associées pour les déclencher posait problème. En effet, les utilisateurs peinaient plus à retenir les raccourcis du clavier que l'espace de la zone géographique explorée. Pour pallier ce problème, nous utilisons le moteur de reconnaissance vocale indépendant du locuteur Vocon 3200[7]. Nous avons défini une bibliothèque de mots qui « déclenchent » une pression sur une touche du clavier lorsque les mots sont reconnus. De cette manière les utilisateurs ne détournent plus leur attention de l'espace de travail du Phantom pour explorer les touches du clavier. Afin d'éviter les reconnaissances intempestives de commandes vocales, nous avons muni le micro d'un « interrupteur-poussoir » qui n'ouvre le circuit que lorsqu'une pression est exercée en continu. Ainsi, pour déclencher une commande, l'utilisateur presse toujours le même interrupteur, dit le mot adéquat, relâche la pression et écoute finalement la réponse. Nous assistons alors à une sorte de dialogue uni-directionnel entre l'utilisateur et l'ordinateur. La description de la fonctionnalité de la « mesure » constitue une bonne illustration de ce fonctionnement.

5.1.3.3 La fonctionnalité de la « mesure »

Parmi les intérêts des cartes numériques, se trouve la possibilité de mesurer des angles et des distances très précisément sans utiliser les instruments traditionnels telles que la « règle de Cras » et la « pointe sèche ». Lorsque l'utilisateur désire effectuer une mesure entre deux éléments, il doit positionner le curseur sur un des éléments et dire « origine », attendre que SeaTouch réponde « origine », puis déplacer le curseur sur le deuxième élément et dire « mesure ». SeaTouch répondra par exemple « cap : 238°, distance : 1,2 kilomètre ».

5.1.3.4 Les changements d'échelles

Les échelles disponibles vont de 1 : 1000 à 1 : 500000. Autrement dit, un centimètre de l'espace de travail du Phantom représente dix mètres à la plus grande échelle et cinq kilomètres à la plus petite échelle.

Si l'utilisateur souhaite changer l'échelle de la carte, il utilise les commandes vocales « plus près » ou « plus loin ». Lorsqu'un changement d'échelle est demandé, la vue est modifiée en conséquence et la nouvelle échelle de la carte est annoncée. Par exemple, si l'utilisateur commande « plus près » alors qu'il était à l'échelle 1 : 2500 alors SeaTouch annonce « dix mètres » et cela signifie que désormais un mouvement du Phantom d'un centimètre dans l'espace réel équivaut à un déplacement de dix mètres dans le monde géographique virtuel de SeaTouch.

[7] www.nuance.com/vocon/3200

5.1.3.5 La fonctionnalité de déplacement de la carte

Lors de la mise au point de « *Dynamic Haptic-Audio Traffic Environment* » *cf.* figure 4.26 p.141), Magnusson *et al.* (2007) montrent que le déplacement d'une carte virtuelle avec le Phantom est moins perturbant en « tirant » la carte qu'en « poussant » les bords. Nos tests pratiques aboutissent aux mêmes conclusions. Ainsi, lorsque l'utilisateur désire atteindre une zone située en dehors de l'espace de travail sans changer d'échelle, il doit maintenir enfoncé un bouton situé sur le stylet du Phantom pour déplacer la carte en fonction de ses mouvements. De cette manière, l'utilisateur peut aisément contrôler l'amplitude de la translation de la carte.

5.2 La navigation virtuelle

5.2.1 Le bateau virtuel

5.2.1.1 Le bateau virtuel et sa recherche guidée

Le bateau virtuel est représenté par un champ attracteur d'un centimètre de rayon. Lorsque le curseur entre en contact avec celui-ci, l'utilisateur peut entendre l'annonce vocale « Sirius », le nom du véritable voilier que nous utilisons pour les expériences de navigation. Pendant que le curseur est « à bord » de Sirius, un son de vague enregistrée à l'avant du voilier retentit. Cette sonification vise à renforcer l'immersion dans la navigation.

Lorsque l'utilisateur recherche le voilier, il dispose d'une fonctionnalité de guidage. Ainsi, la pression du second bouton du stylet du Phantom déclenche une force en direction du bateau virtuel. Cette fonctionnalité est particulièrement appréciable lorsque l'utilisateur souhaite retrouver Sirius après avoir quitté le voilier virtuel pour explorer la configuration de la zone cartographique vers laquelle il se dirige.

5.2.1.2 Les déplacements du bateau

Les déplacements du voilier virtuel dépendent de ses interactions avec le vent virtuel. La vitesse et la direction de ce vent sont des paramètres accessibles dans SeaTouch. L'angle formé par le cap du voilier et la direction du vent détermine sa vitesse. Cette dernière peut être représentée sur un graphique polaire (*cf.* figure 5.3). Ainsi, SeaTouch intègre la « polaire de vitesse « de Sirius, voilier de huit mètres de type « *Ecume de Mer* ».

Le cap du voilier virtuel peut donc être modifié de la même manière qu'avec le pilote automatique de Sirius. Plus précisément, l'utilisateur peut augmenter ou diminuer le cap du voilier d'un, dix ou quatre-vingt-dix degrés. En condition de navigation virtuelle, les commandes vocales disponibles sont :

« bâbord 1, 10 ou 90 » ou « tribord 1, 10 ou 90 ».

Le simulateur n'intègre pas encore les dérives dues aux courants de marées et aux courants de surface. Par conséquent un moyen de s'arrêter est de prendre un cap face au vent. Le « naufrage virtuel » est un autre moyen de s'arrêter. En effet, si le voilier entre en collision avec la côte ou une balise, des bruits de vitres brisées et un message de détresse en morse retentissent fortement. Les réactions des utilisateurs face à cet artefact auditif semblent témoigner d'une bonne immersion dans la navigation virtuelle.

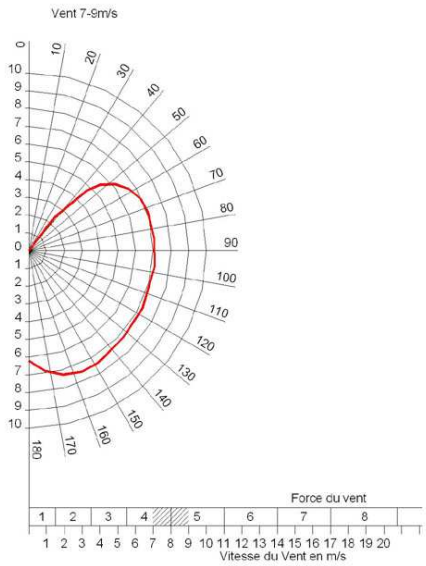


Figure 5.3 – Polaire de vitesse d'un voilier de type « *Ecume de Mer* ». Ce graphique polaire se lit de la façon suivante : « Pour un vent entre 4 et 5 Beauforts, lorsque l'angle entre le voilier et le vent est de 90°, la vitesse du bateau est de 7 nœuds.

5.2.2 Les sons spatialisés du vent et des bouées

5.2.2.1 La réification du vent

Lors d'une navigation virtuelle à la voile, la direction du vent est un élément particulièrement important. Afin de rendre cette perception plus intuitive, nous avons intégré un système de spatialisation du son du vent. Ce son est donc perçu par l'utilisateur à l'azimut auquel il arrive sur le voilier virtuel en navigation. Autrement dit, nous déterminons l'angle du « vent apparent » en additionnant le « vent réel » (vent météorolologique) et le « vent vitesse » (vent créé par l'avancement du voilier). Ainsi, trois sons différents enregistrés à bord de Sirius permettent la réification du vent.

- Lorsque l'angle du vent réel est inférieur à quarante degrés, le voilier est considéré face au vent. Un son de « battements des voiles » est alors joué en boucle à l'azimut correspondant.

- Si l'angle du vent réel est compris entre quarante et cent-quatre-vingt degrés, un son de « vent » se fait entendre à l'azimut correspondant de façon continue.
- Dès que cet angle est de cent-quatre-vingt degrés ou passe par cette valeur, un son de bôme (barre qui tient le bas de la grand voile) qui change d'amure (de côté) est joué de façon ponctuelle afin de matérialiser l'« empannage » (changement de côté de la grand voile). Certains marins aveugles baissent la tête au passage de la baume virtuelle. Bien que ces derniers ne soient pas immergés au point de craindre le choc, nous notons combien les sujets se prêtent au jeu de l'immersion dans la navigation virtuelle à la voile.

Outre la prise en compte de la direction du vent apparent, le système de vent sonore virtuel se réfère également à sa vitesse. Ainsi, plus le vent apparent est fort, plus le volume des sons joués est important.

5.2.2.2 La présence des balises

En mer, certaines balises sifflantes ou munies de cloches émettent des sons. Pour les marins aveugles, il est regrettable qu'elles ne soient pas plus nombreuses. Dans SeaTouch, toutes les balises sont sonores. Cependant, l'utilisateur ne perçoit que la plus proche si sa distance est inférieure à 500 mètres. Plus précisément, un son de « cloche » retentit à l'azimut correspondant, c'est-à-dire en fonction de sa position relative au voilier virtuel. L'intensité de ce son dépend de la distance qui sépare le voilier de la balise. Par ailleurs, lorsque la balise la plus proche change, nous utilisons un deuxième son de cloche afin d'en informer l'utilisateur. Par exemple, si un son est perçu à quatre heures, puis un nouveau à deux heures, cela signifie que la balise associée au premier son est devenue plus éloignée que celle associée au nouveau son. A l'utilisation, ces perceptions se révèlent particulièrement intuitives.

5.2.3 Les informations vocales de navigation virtuelle

Au cours des navigations virtuelles, l'utilisateur a accès à différentes informations relatives au voilier, au vent et aux balises :

Commandes vocales	Informations	Réponses SeaTouch
« cap »	direction du bateau	« *cap 135°* »
« vitesse »	vitesse du bateau	« *vitesse 4,1 nœuds* »
« direction vent »	direction du vent réel	« *vent 11 heures* »
« vent météo »	direction du vent météo	« *vent météo nord* »
« vitesse vent »	vitesse du vent	« *vitesse vent 14 nœuds* »
« balise »	azimut et distance de la balise	« *radeau midi ; 1,2km* »

Tableau 5.1 – Informations de navigation disponibles pour les sujets en cours de navigation *in virtuo*. Lorsque les sujets prononcent un mot d'information, l'annonce vocale correspondante est déclenchée.

5.3 SeaTouch embarqué

A bord du véritable *Sirius*, nous utilisons un ordinateur embarqué connecté aux instruments de navigation (G.P.S. ; Girouette,...). SeaTouch intègre les informations de la même manière qu'il s'agisse de navigations réelles ou virtuelles. Cependant, seules les informations vocales (amplifiées) sont disponibles. Le Phantom n'est pas particulièrement adapté au milieu marin et la présence de vent sur le pont limite les possibilités de spatialisation du son des balises.

Dans un souci de clarté, nous ne détaillerons pas ici les fonctionnalités liées aux points de routes et aux routes (« relèvement point de route, distance point de route, annonce de la route,... »), ainsi que la grande quantité d'informations vocales disponibles à bord (« caps magnétique ou GPS, vitesses sur la surface ou du GPS, dérive et intensité du courant, profondeur,... »). Celles-ci n'étant pas utilisées pour notre expérimentation nous ne préférons pas encombrer le lecteur. Nous précisons néanmoins que dans une situation ordinaire de navigation (différente des situations expérimentales), SeaTouch répond tout à fait au besoin d'actualiser les informations de navigation des marins aveugles.

5.4 SeaTouch et les référentiels spatiaux

Le cahier des charges de SeaTouch a été largement influencé par la question de la coordination des référentiels spatiaux. Aussi certaines fonctionnalités s'y réfèrent directement.

5.4.1 Les unités de navigation

Les annonces vocales de SeaTouch concernent des distances et des orientations. Les orientations peuvent être annoncées.

5.4.1.1 Dans un référentiel de type égocentré

→ En horaires : « *midi* » désigne devant et « *six heures* » derrière. Les horaires sont déclinés toutes les demi-heures, la précision est donc de ± 15°.

→ En degrés tribord-bâbord. « *90°* » désigne à droite par exemple. Ici la précision est au degré près.

5.4.1.2 Dans un référentiel de type allocentré

→ En points cardinaux : « *nord - nord-ouest* » par exemple. Les points cardinaux sont au nombre de seize. La précision est donc de ± 11,25°.

→ En degrés cardinaux : « *270°* » désigne l'ouest par exemple. Ici la précision est au degré près.

Ces unités de navigation sont paramétrables en cours des navigations virtuelles et réelles.

5.4.2 L'orientation de la carte haptique en navigation virtuelle

L'orientation de la carte peut s'inscrire dans l'un ou l'autre des référentiels spatiaux.

5.4.2.1 La navigation virtuelle en mode *Northing*

Classiquement les cartes sont présentées avec le nord en haut, soit dans un référentiel de type allocentré. Au cours de la navigation virtuelle avec SeaTouch en mode *Northing*, le voilier se déplace sur la carte mais la position et l'orientation de celle-ci ne bouge pas (*cf.* figure 5.4).

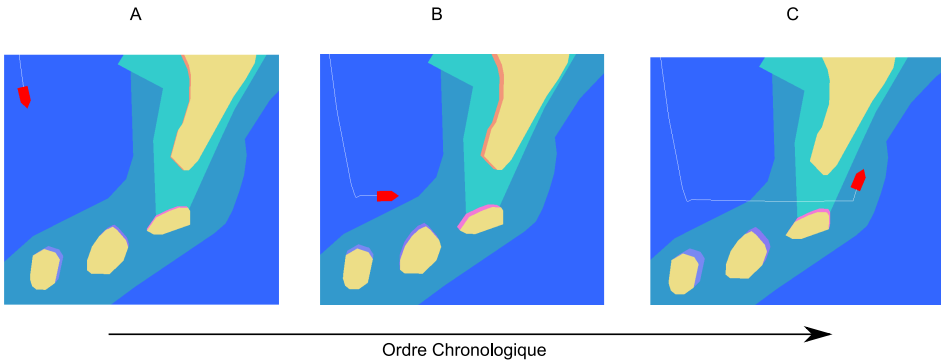


Figure 5.4 – SeaTouch en mode *Northing*. La position et l'orientation de la carte restent fixes alors que le voilier virtuel se déplace. Cette vue de la carte virtuelle de SeaTouch s'inscrit dans un référentiel de type allocentré.

5.4.2.2 La navigation virtuelle en mode *Heading*

A l'inverse, au cours des navigations virtuelles de SeaTouch en mode *Heading*, le voilier ne bouge pas dans l'espace de travail du Phantom alors qu'il se déplace dans l'espace géographique. Par conséquent la carte tourne et défile de part et d'autre du voilier virtuel (*cf.* figure 5.5).

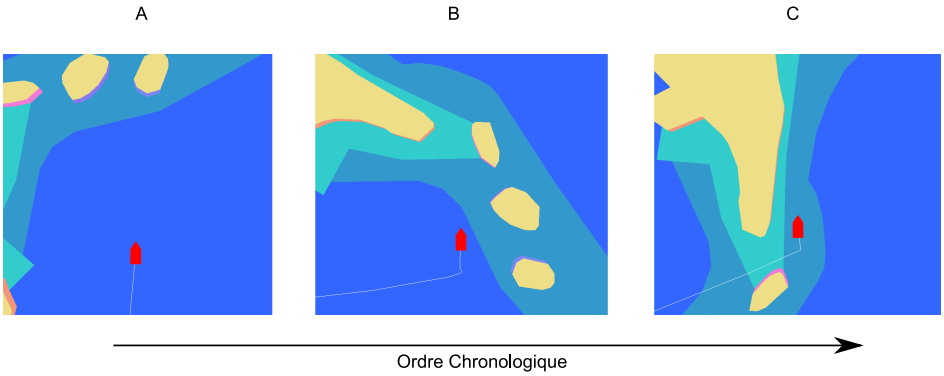


Figure 5.5 – SeaTouch en mode *Heading*. La position et l'orientation de la carte changent au fur et à mesure de l'avancement du voilier virtuel. Ainsi, alors que le voilier reste fixe, la carte tourne et défile. Cette vue de la carte virtuelle de SeaTouch s'inscrit dans un référentiel de type égocentré.

Les modes *Northing* et *Heading* sont disponibles au cours des navigations virtuelles.

5.4.3 Synthèse sur les conditions d'utilisation et les référentiels

Les conditions d'utilisation de SeaTouch consistent à explorer la carte et réaliser une navigation virtuelle afin de permettre à l'utilisateur de s'entraîner à coordonner les référentiels spatiaux avant d'aller naviguer véritablement.

Lors de l'exploration des cartes, seules les informations de type allocentré sont disponibles. En

effet, la carte haptique se présente avec le nord en face de l'utilisateur et la fonction de mesure permet d'évaluer la direction entre deux objets en prenant le nord comme référence.

Au cours des navigations virtuelles, les sonifications du vent et des balises s'inscrivent dans un référentiel de type égocentré puisqu'elles simulent leur présence autour de l'utilisateur (*cf.* § 5.2.2 p.157). Ensuite, les informations vocales peuvent s'inscrire dans les deux référentiels. Par exemple, le cap du voilier virtuel est allocentré (« 270° ») alors que l'azimut de la balise la plus proche est égocentré (« une heure ») dans notre expérience de navigation. Finalement, en fonction des conditions d'utilisation *Northing* ou *Heading*, la carte haptique se présente respectivement dans des référentiels de types égo ou allocentrés au cours des navigations virtuelles.

Au cours des navigations réelles les informations vocales disponibles sont identiques à celles des navigations virtuelles. Cependant les véritables sensations de vent et de déplacement du voilier s'inscrivent évidemment dans un référentiel de type égocentré.

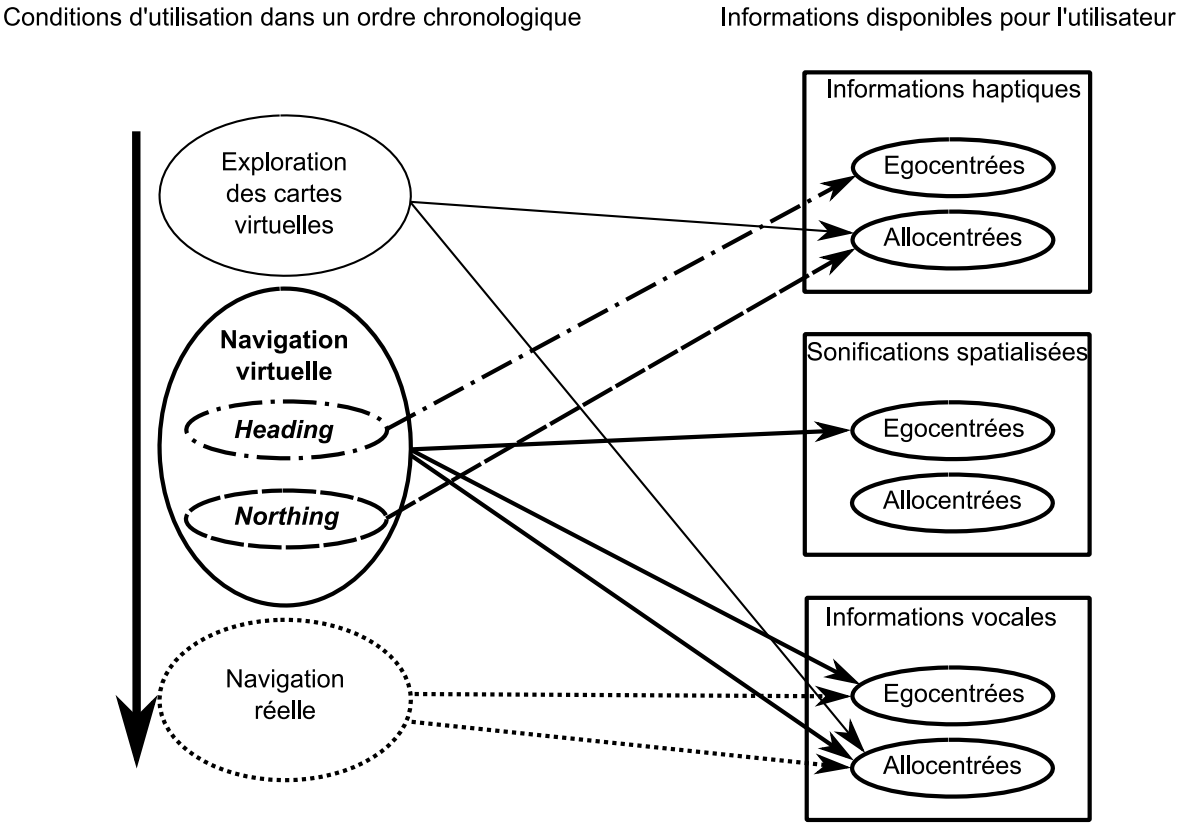


Figure 5.6 – Évolution des informations issues des différents types de référentiels spatiaux en fonction des conditions d'utilisation de SeaTouch. Les informations haptiques concernent le rendu des cartes. Il s'agit du mode *Northing* dans le référentiel allocentré (le voilier se déplace sur la carte) et du mode *Heading* dans le référentiel égocentré (la carte défile autour du voilier). Les sonifications spatialisées désignent les sons des balises et du vent. Les informations vocales sont principalement le cap du voilier dans le référentiel allocentré et les azimuts des balises dans le référentiel égocentré.

En résumé, SeaTouch fournit aux marins aveugles des cartes et des navigations maritimes virtuelles. Deux questions se posent donc :

- Les cartes virtuelles permettent-elles aux marins non-voyants de construire des représentations spatiales de l'espace maritime ?
- Si oui, quelles sont les conditions d'utilisation des navigations virtuelles les plus favorables au transfert d'apprentissage vers les situations naturelles ?

Afin de tenter de répondre à ces questions, nous présentons la méthodologie générale dans le chapitre 6.4.3.2 et détaillons les déroulements et les résultats des deux expériences correspondantes dans les chapitres suivants.

Chapitre 6

Méthodologie générale

Afin de répondre aux questions posées dans le chapitre précédent (*cf.* 5.4.3), nous menons deux séries d'expériences :

L'**expérience cartographique** vise à comparer les représentations spatiales construites par les marins non-voyants à la suite des explorations d'une carte en relief, d'une carte virtuelle de SeaTouch et d'une description vocale. La méthodologie spécifique de cette expérience sera présentée dans le chapitre 7 (*cf.* p.177).

L'**expérience de navigation** consiste à comparer les représentations spatiales élaborées au cours de navigations virtuelles en mode *Northing* (nord en face) et *Heading* (cap en face). Nous cherchons ici à déterminer les conditions dans lesquelles les navigations virtuelles de SeaTouch sont les plus intéressantes pour un transfert d'apprentissage vers des navigations naturelles. La méthodologie spécifique de cette expérience sera présentée dans le chapitre 11 (*cf.* p.231).

Nous présentons ici tous les éléments méthodologiques communs à ces deux expériences. Chacune comporte une phase d'apprentissage et une phase de restitution des apprentissages.

6.1 Les sujets

Les personnes non-voyantes pratiquant la voile dans le Finistère et disponibles pour les expériences ne sont pas nombreuses. Six sujets, pratiquant la voile à Brest avec l'association Orion@, constituent notre échantillon expérimental. Chaque sujet participe aux deux expériences. Les critères de sexe, d'âge, d'âge de survenue de la cécité, d'expertise en voile, de familiarisation avec la cartographie, de connaissance en informatique et de niveau d'études général sont présentés dans le tableau 6.1.

	Sexe	Age	Age cécité	Voile	Cartographie	Informatique	Etudes
S1	M	27	24	+	++	+	+
S2	M	27	18	+	+	-	+
S3	M	45	23	++	++	+	++
S4	M	47	42	++	+	+	-
S5	F	44	0	+	+	+	+
S6	M	36	0	+	++	++	+

Tableau 6.1 – Les caractéristiques des sujets par domaines. (« M » = Masculin ; « F » = Féminin ; « ++ » = Expert ; « + » = Familié ; « - » = Pratique occasionnelle).

6.2 La phase d'apprentissage

Au cours de la phase d'apprentissage, il est demandé aux sujets d'apprendre les configurations des différentes cartes dans l'expérience cartographique ; puis de réaliser une navigation virtuelle autour d'un parcours qu'ils retrouveront en situation naturelle dans l'expérience de navigation. Les configurations sont donc au centre de nos préoccupations.

6.2.1 Les configurations

Les cartes utilisées pour l'ensemble de ces expériences se composent de la terre, la côte et la mer et d'une configuration de six balises auxquelles nous avons attribué des noms (« pingouin », « remorqueur », « triangle »...).

Les expériences se déroulent à l'échelle fixe de 1 : 10 000, soit 1 centimètre pour 100 mètres.

Nous utilisons une carte en relief, une description vocale et une carte virtuelle pour l'expérience cartographique d'une part, et deux cartes virtuelles pour l'expérience de navigation d'autre part.

@www.orion-brest.com

Afin d'éviter les effets d'apprentissage et les différences d'encodage liées aux configurations des balises sur les cartes, nous appliquons des rotations de soixante puis cent quatre vingt degrés à une configuration initiale (*cf.* figure 6.1).

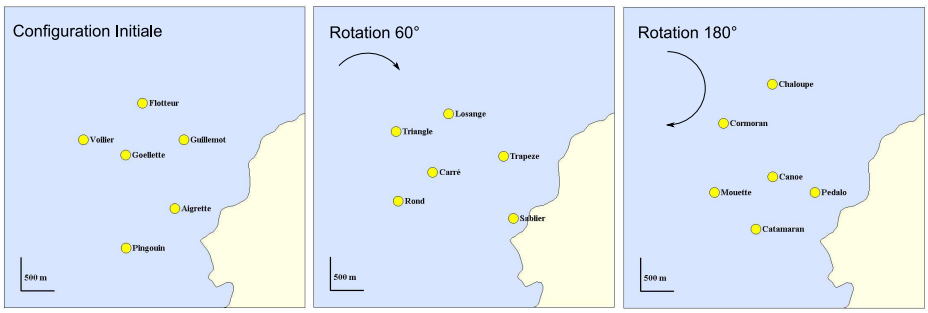


FIGURE 6.1 – Configurations des cartes utilisées lors de l'expérience cartographique.

La configuration de la carte de l'expérience de navigation en condition *Northing* est également issue d'une rotation d'un multiple de soixante par rapport à la configuration initiale. Par contre celle de la condition *Heading* a été construite au moyen d'un axe de symétrie passant par le point central de la configuration (*cf.* figure 6.1). Nous justifierons ce choix au cours de la description de la procédure de l'expérience de navigation.

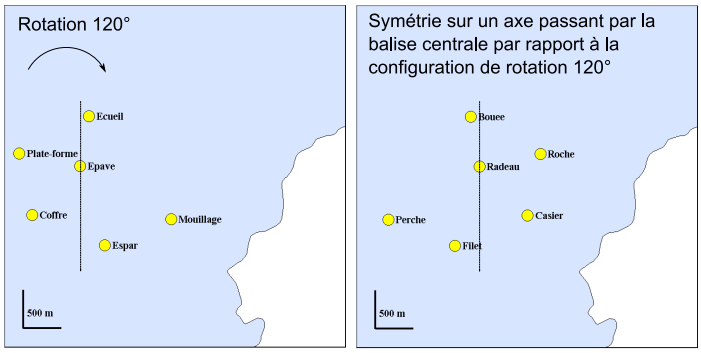


FIGURE 6.2 – Configuration des cartes utilisées lors de l'expérience de navigation.

6.2.2 L'enregistrement des *patterns* d'exploration

Pendant la phase d'apprentissage, l'application de *monitoring* de SeaTouch nous permet d'enregistrer différentes informations relatives à l'activité exploratoire des sujets à une fréquence de vingt Hertz :

→ le temps d'exploration (en millisecondes).

→ les positions du Phantom (x,y,z) dans l'espace de travail réel (en millimètres).

→ les positions du Phantom (x,y) dans l'espace géographique (en U.T.M. : Transverse Universel de Mercator, c'est-à-dire en mètres par rapport au méridien de Greenwich en abscisses et par rapport à l'équateur en ordonnées).
→ les positions du voilier virtuel ou réel dans l'espace géographique (en U.T.M.).
→ les différents contacts entre le curseur et les balises, la côte et le voilier virtuel.

Ces enregistrements visent l'analyse des *patterns* d'exploration haptiques des sujets.

6.3 La phase de restitution des apprentissages

6.3.1 Un outil de mesure : le rapporteur breton

Lors de la phase de restitution des apprentissages, les sujets ne peuvent plus consulter la carte et doivent estimer les directions des balises *via* un rapporteur breton permettant ensuite à l'expérimentateur de lire le résultat.

Cet outil se constitue d'une règle en plastique rectangulaire de quarante centimètres de long et de onze centimètres de large sur laquelle se trouve un disque pivotant gradué de zéro à trois cent soixante degrés. Habituellment, les navigateurs voyants alignent le nord du disque avec le nord de la carte par transparence. Ensuite les graduations permettent de positionner la règle selon la valeur recherchée avant de tracer la ligne.

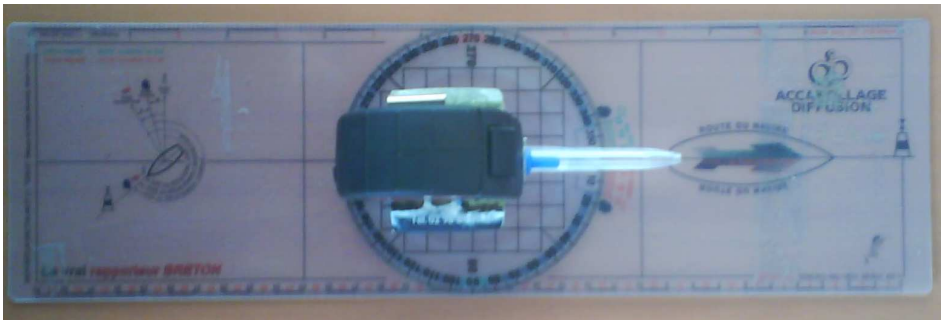


Figure 6.3 – Illustration du rapporteur breton doté d'un axe en relief (stylo). La partie rectangulaire, la règle, est solidaire de la table et se trouve en face du sujet. La partie circulaire, le disque, comportant un axe en relief, est mobile pour permettre aux sujets non-voyants de viser des directions. Les graduations permettent à l'expérimentateur de relever les valeurs.

Le rapporteur breton est un outil cartographique spécifique à la navigation maritime. Son utilisation classique nécessite le concours d'un compas de relèvement, c'est-à-dire une boussole dotée d'une visée. Les navigateurs relèvent les orientations cardinales numériques de trois points remarquables qui sont à la fois visibles depuis le bateau et identifiables sur la carte. Le rapporteur breton permet de

reporter ces relèvements (230°, 180° et 90° par exemple) sur la carte. Plus précisément, il s'agit de tracer trois lignes passant chacune par leur point remarquable respectif et orientées conformément à leur relèvement respectif. Les intersections de ces trois lignes forment un triangle au sein duquel se trouve le bateau. C'est le principe de la triangulation.

Nous utilisons cet outil de mesure pour relever les estimations que font les sujets des directions relatives des balises. Il doit donc être accessible aux aveugles. Pour ce faire, le disque comporte un axe en relief constitué d'un stylo collé et orienté de façon à passer par la graduation zéro du disque (*cf.* figure 6.3). Grâce à cet axe en relief, les sujets peuvent percevoir l'orientation du disque du rapporteur breton. La règle étant fixée sur la table en face des sujets, ces derniers peuvent viser les différents points remarquables au moyen de cet outil. Sur la règle un repère permet à l'expérimentateur de lire la valeur du relèvement. Ces valeurs nous permettent de tracer les représentations mentales des sujets en utilisant la technique de la triangulation.

L'intérêt du rapporteur breton est de permettre à l'expérimentateur de relever les valeurs des angles estimés. Le pointage avec le rapporteur se substitue donc au pointage avec le doigt. Autrement dit, le rapporteur breton est dans le prolongement du corps des sujets et son utilisation est considérée comme « transparente ».

Rappelons qu'au cours de la phase de restitution des apprentissages les sujets ne disposent plus de la carte. Nous leur posons alors des questions « *alignées* » et « *non-alignées* ».

6.3.2 Les questions alignées et non alignées

6.3.2.1 Les questions alignées

Pour répondre à la question alignée *« vous êtes au Pingouin, où se trouve le Zodiac ? »* les sujets imaginent se trouver à la position de la balise initiale (« Pingouin »), puis dirigent la visée du rapporteur breton comme s'ils pointaient du doigt la balise visée (« Zodiac ») (*cf.* figure 6.4.a).

Ainsi, lors des questions alignées, il est demandé aux sujets de réaliser une translation mentale jusqu'à la position d'une balise se trouvant sur la carte. Ils estiment ensuite la direction d'une autre balise. On parle de situation alignée.

En situation alignée, l'orientation imaginée par les sujets est parallèle à l'axe « sud-nord » des cartes. Elles correspondent également à l'orientation initiale d'apprentissage. Les référentiels de types égo et allocentrés sont donc confondus. Ainsi, répondre à ces questions ne demande pas aux sujets de coordonner les deux référentiels. Ici, nous évaluons donc la précision de la représentation construite par les sujets.

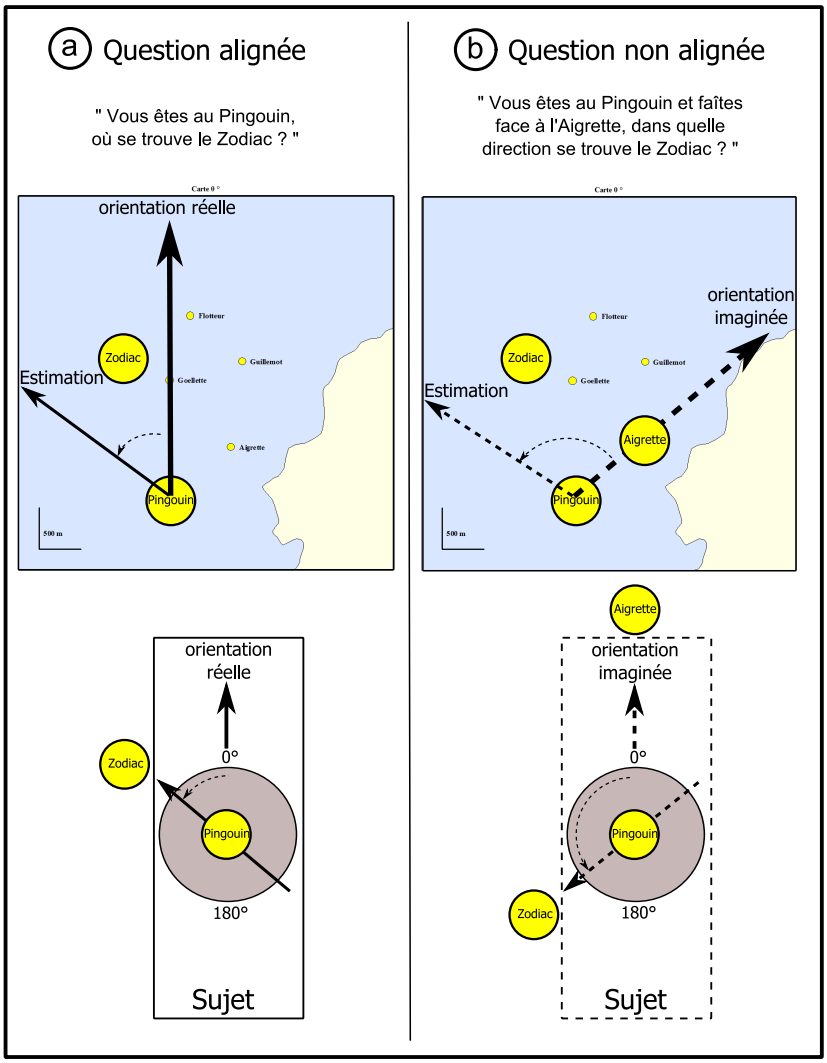


Figure 6.4 – Illustration des principes de recueil de données dans les cas des questions alignées et non alignées. Les rectangles représentent la règle fixée à la table. Les disques pleins correspondent aux parties mobiles permettant au sujet de viser. Les noms cerclés symbolisent les balises imaginées.

6.3.2.2 Les questions non alignées

Pour répondre à la question non alignée *« vous êtes au Pingouin et faites face à l'Aigrette dans quelle direction se trouve le Zodiac ? »* les sujets imaginent se trouver à la position de la balise initiale (« Pingouin ») et être orientés vers la seconde balise (« Aigrette »). Ils dirigent alors la visée du rapporteur breton comme s'ils pointaient du doigt depuis leur position et leur orientation imaginées vers la balise visée (« Zodiac ») (*cf.* figure 6.4.b).

Ainsi, lors des questions non-alignées, il est demandé aux sujets de réaliser une translation mentale vers une balise, puis une rotation mentale vers une autre balise. Depuis ces nouvelles position et orientation imaginées, ils estiment alors la direction d'une troisième balise. On parle de situation non

alignée.

En situation non alignée, l'orientation imaginée par les sujets est différente de l'axe « nord-sud » des cartes. Les référentiels de types égo et allocentrés ne sont donc plus confondus. Ainsi, les sujets doivent coordonner ces deux référentiels pour répondre aux questions non-alignées. Une seule estimation de direction en situation non-alignée résulte en fait de deux estimations de directions relatives à la configuration. Ici nous mesurons la capacités des sujets à coordonner les deux types de référentiels spatiaux.

6.3.3 Le recueil de données

Les réponses alignées sont simplement relevées sur le rapporteur breton. Les réponses non alignées sont une addition de l'orientation introduite dans la question et de la direction pointée. Par exemple, pour la question *« vous êtes au Pingouin et faites face à l'Aigrette, dans quelle direction se trouve le Voilier ? »* , nous ajoutons l'angle du « Voilier » estimé par le sujet à l'angle exact entre le « Pingouin » et l' « Aigrette ». Nous reportons ces valeurs dans le tableau 6.2 ci-dessous.

	Depuis	Où est ?	R. alignées	Depuis	Face à	Où est ?	R. non alignées
1	Pingouin	Zodiac	(0 à 359°)	Pingouin	Aigrette	Zodiac	(0 à 359°)
2	Aigrette	Flotteur	(0 à 359°)	Aigrette	Goélette	Flotteur	(0 à 359°)
... 18	...	...	...	...	...	...	...

Tableau 6.2 – Exemple de feuille de résultats lors de la phase de restitution des apprentissages.

Pour chaque sujet, nous recueillons donc dix-huit estimations issues des questions alignées et non alignées. De cette manière, nous disposons de trois directions pour chaque balise et pouvons réaliser une triangulation. Par ailleurs, les balises d'origine et de destination des estimations sont identiques. La balise vers laquelle le sujet imagine être tourné n'est qu'un artefact impliquant une rotation mentale. Nous sommes donc en mesure d'utiliser les tests statistiques sur des échantillons appariés lors de l'analyse statistique.

6.4 Le traitement des données

Le problème de l'extériorisation des connaissances spatiales est présenté par Milgram (1973) comme une quête d'analyse objective. Kitchin *et al.* (1997) recensent l'ensemble des méthodes expérimentales utilisées pour évaluer les connaissances spatiales des individus privés de la vue. Nous nous inspirons plus particulièrement de trois méthodes pour caractériser trois niveaux de connaissance

spatiale : le niveau des **directions**, le niveau des **localisations** et le niveau des **configurations**.

Ces niveaux reposent sur des variables allant de la plus simple à la plus complexe, de la plus séquentielle à la plus globale. Nous présentons ici les principes, intérêts et articulation de ces trois niveaux.

6.4.1 Le niveau des directions

Lors de la phase de restitution des apprentissages, les estimations des directions des balises par les sujets créent des erreurs angulaires (Ea). Cette Ea est l'angle qui existe entre les réponses des sujets et les bonnes réponses (*cf.* figure 6.5).

Nous travaillons sur les valeurs absolues de ces angles afin d'éviter que les erreurs d'estimation situées des côtés opposés ne se compensent pas lors du calcul de la moyenne. Soulignons qu'elles représentent des mesures d'erreur. Ainsi, plus l'Ea est petite, plus la performance est grande.

L'Ea offre un premier niveau d'analyse. En effet, cette variable nous informe sur les précisions des constituants élémentaires d'une représentation spatiale de type carte. Ainsi, l'analyse des Ea est un indicateur de la précision de l'encodage des relations locales. Au cours des présentes expériences, nous évaluons donc la mémorisation des **directions relatives** des balises deux à deux.

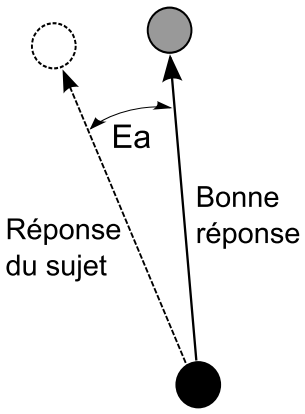


Figure 6.5 – Les erreurs angulaires (Ea). Le point noir représente la balise d'origine des estimations de direction, le point gris la balise de destination. La double flèche correspond à l'erreur angulaire (Ea) (en degrés) entre la réponse du sujet et la bonne réponse, soit l'erreur d'estimation de direction.

6.4.2 Le niveau des localisations

Au niveau des localisations, tout comme Hardwick *et al.* (1976) utilisaient ce procédé sous le nom de la « convergence projective », nous construisons un triangle à partir des estimations de direction d'une balise depuis trois autres (*cf.* figure 6.6).

Nous obtenons ainsi des triangles permettant de caractériser les représentations spatiales des sujets selon deux variables.

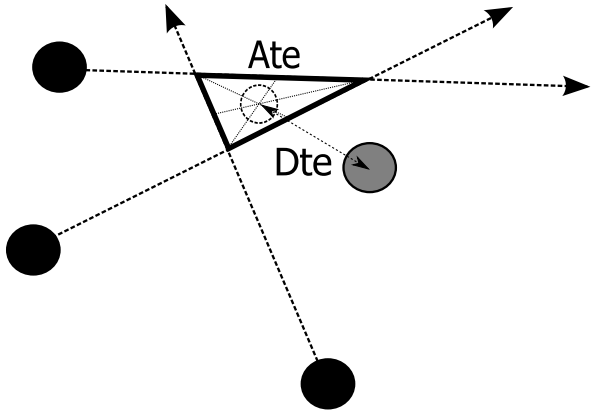


Figure 6.6 – La « convergence projective » (Hardwick *et al.*, 1976). Les trois points noirs représentent les balises d'origine des estimations de directions. Le point gris est la balise de destination. L'aire du triangle en gras correspond à l'aire du triangle d'erreur (Ate). Il est construit à partir des intersections des trois estimations de direction de la balise de destination depuis les balises d'origine. Le point blanc en pointillé (barycentre du triangle d'erreur) représente la localisation cognitive de la balise de destination. La double flèche correspond à l'erreur de distance (Dte) entre la localisation cognitive et la localisation réelle de la balise de destination.

6.4.2.1 La distance d'erreur de la localisation cognitive (Dte)

Au barycentre du triangle se trouve la « localisation cognitive ». Cette position correspond au lieu où le sujet imagine que la balise de destination se trouve par rapport aux trois balises d'origine. La distance séparant la localisation cognitive et la position réelle de la balise de destination est appelée l'erreur de distance (Dte). S'agissant d'une mesure d'erreur, plus la Dte est petite, plus la performance est grande.

Après le calcul des Ea, celui des Dte constitue un second niveau d'analyse. En effet, cette variable traduit la précision de la localisation cognitive d'une balise par rapport aux trois autres. Au cours de notre expérience, l'analyse des Dte est un indicateur sur la précision de l'encodage de la **position relative** d'une balise.

6.4.2.2 L'aire du triangle d'erreur (Ate)

Le calcul de l'aire du triangle d'erreur (Ate) complète la Dte au sein de ce second niveau d'analyse. En effet, cette variable témoigne de la cohérence des réponses des sujets. L'Ate peut donc être considérée comme un indice de la « consistance » de localisation cognitive. Au cours de nos expériences, l'analyse des Ate est un indicateur de la **cohérence de la position relative** d'une balise.

Finalement, le niveau des localisations nous informe à la fois sur la précision et sur la cohérence des représentations spatiales construites par les sujets au cours de la phase d'apprentissage. Plus la Dte est importante, moins la représentation spatiale est précise. De la même manière plus l'Ate est grande, moins la représentation spatiale est cohérente.

6.4.3 Le niveau des configurations

Le niveau des configurations analyse la précision des représentations mentales globales construites par les sujets à la suite des différentes phases d'apprentissage. Les configurations sont constituées de l'ensemble des localisations cognitives issues de la convergence projective. L'analyse des configurations fait appel à la méthode de la régression bidimensionnelle (Tobler, 1965; Friedman et Kohler, 2003). Il s'agit ici de mesurer la ressemblance entre les configurations cognitive et réelle (*cf.* figure 6.7).

Les deux principales variables issues de la régression bidimensionnelle sont le coefficient de corrélation (r) et l'index de distorsion (DI). Elles témoignent de l'exactitude générale de la connaissance spatiale de type carte construite par les sujets au cours des expériences.

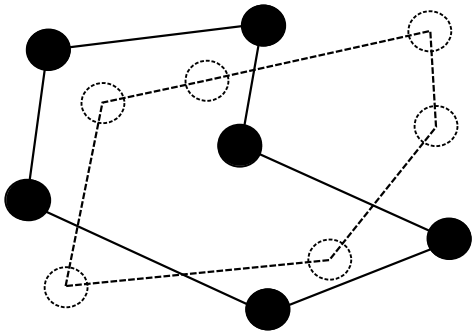


Figure 6.7 – Le niveau des configurations. Les 6 points noirs correspondent aux localisations des 6 balises réelles. Les 6 points blancs en pointillé représentent les localisations cognitives obtenues à partir de la convergence projective. Ainsi, le polygone en trait continu est la configuration de l'ensemble des balises et le polygone en pointillé représente la configuration cognitive des sujets.

6.4.3.1 Le coefficient de corrélation entre deux configurations (r)

La méthode calculatoire de Friedman et Kohler (2003) permet d'extraire la ressemblance globale entre deux configurations : le coefficient de corrélation r. Plus précisément, cette variable mesure la concordance des formes des localisations cognitive et réelle une fois que les opérations de translation, de rotation et d'homothétie ont été réalisées (*cf.* figure 6.8). Pour nos expériences, r est donc un indicateur de la **ressemblance de la configuration cognitive** avec la configuration réelle des balises. Plus la

valeur du r se rapproche de 1 plus la ressemblance est grande.

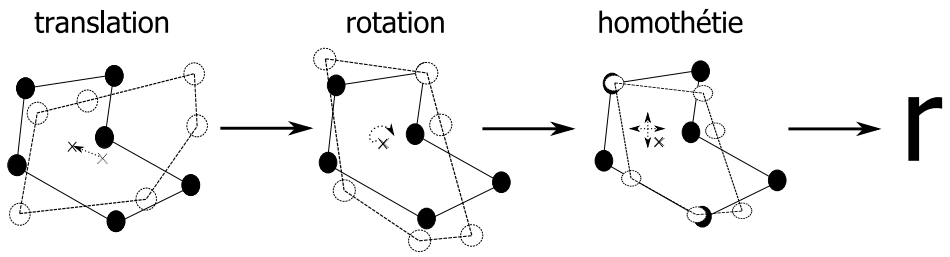


Figure 6.8 – Les opérations de translation, de rotation et d'homothétie réalisées pour l'obtention du coefficient de corrélation entre deux configurations : r.

6.4.3.2 L'indice de distorsion (DI)

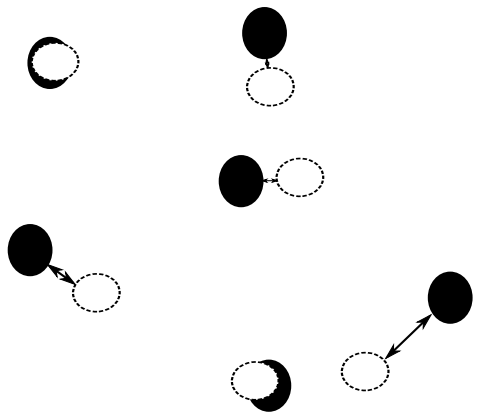


Figure 6.9 – L'indice de distorsion DI. Les doubles flèches représentent les distances résiduelles entre les transformations.

Dans la continuité des travaux de Waterman et Gordon (1984) et Giraudo et Pailhous (1994), Friedman et Kohler (2003) proposent un indice de distorsion (DI). Cette variable nous informe sur les distances résiduelles entre deux configurations après les transformations de translation, rotation et l'homothétie précédemment citées. Au cours de nos expériences, DI est donc un indicateur de la **distorsion de la configuration cognitive**. Plus la valeur de l'indice est élevée, plus la représentation mentale de la configuration des sujets a subi de distorsions.

Le tableau 6.3 résume les variables des trois niveaux de connaissances spatiales.

Cette méthodologie générale sera appliquée de la même manière lors des expériences suivantes.

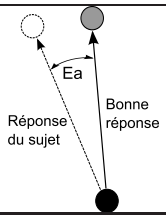
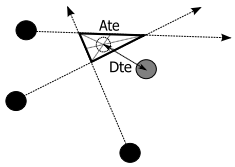
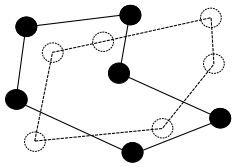
Niveaux	Variables	Significations	Illustrations
Directions	Erreur angulaire (Ea)	Précision des estimations de direction	
Localisations	Erreur de distance (Dte) et aire du triangle d'erreur (Ate)	Précision des localisations et cohérence des localisations	
Configurations	Coefficient de corrélation r et indice de distorsion (DI)	Ressemblance entre les configurations cognitive et réelle	

Tableau 6.3 – Les variables des différents niveaux de connaissance spatiale.

Chapitre 7

Méthode de l'expérience de cartographie

Dans cette partie, nous cherchons à vérifier si les cartes virtuelles de SeaTouch permettent aux marins non-voyants de construire des connaissances spatiales précises de l'espace maritime. Nous émettons une première hypothèse selon laquelle **la carte virtuelle de SeaTouch permet aux marins non-voyants de construire des connaissances spatiales d'une précision au moins équivalente à celles construites à partir d'une carte en relief ou d'une description vocale (hypothèse 1)**. Notre expérience cartographique consiste donc à comparer les connaissances spatiales construites par les sujets à la suite des explorations d'une carte en relief, d'une description vocale et d'une carte virtuelle de SeaTouch.

Par ailleurs, nous cherchons à identifier des stratégies d'exploration haptique favorisant l'élaboration de ces connaissances. Ainsi nous formulons une seconde hypothèse selon laquelle **au cours de l'exploration d'une carte virtuelle de SeaTouch, l'utilisation de stratégies d'exploration haptique de type allocentré améliore la précision de la représentation spatiale construite par des sujets aveugles (hypothèse 2)**. Nous analysons donc les *patterns* d'exploration des sujets au cours de leur apprentissage de la configuration de la carte virtuelle de SeaTouch.

7.1 Les cartes

Au sein de cette expérience cartographique, nous présentons l'information spatiale suivant trois conditions : une carte virtuelle de SeaTouch (CVi), une carte en relief classique (CeR) et une description vocale (CVo).

7.1.1 La carte virtuelle (CVi)

Les cartes virtuelles sont détaillées dans le chapitre 5.4.3 concernant la description de SeaTouch (*cf.* § 5.1.1 p.152). La configuration des six balises de la carte virtuelle utilisée au cours de l'expérience cartographique est illustrée sur la figure 7.1.

Figure 7.1 – Représentation de la carte virtuelle de SeaTouch. La mer est en bleu, la terre est en jaune et les balises sont les croix noires.

7.1.2 La carte en relief (CeR)

Les cartes en relief sont couramment utilisées par les marins non-voyants de l'association Orion. Ces cartes de trente centimètres de haut sur quarante de large sont de fabrication « artisanale ». Pour cette étude, nous avons imprimé une carte sur du papier au format A3. Nous l'avons ensuite plastifiée avant de la recouvrir de peinture incrustée de sable sur la zone de terre. Le trait de côte est repassé avec de la « pâte à contour » produisant un trait en relief. Ainsi, cette carte offre des textures contrastées : la mer est lisse, la terre est rugueuse et le trait de côte est nettement défini. Les six balises sont faites de feutrine autocollante de formes géométriques différentes (triangle, carré, rond, losange, trapèze, sablier). Ces objets se distinguent aisément par le toucher (*cf.* figure 7.2).

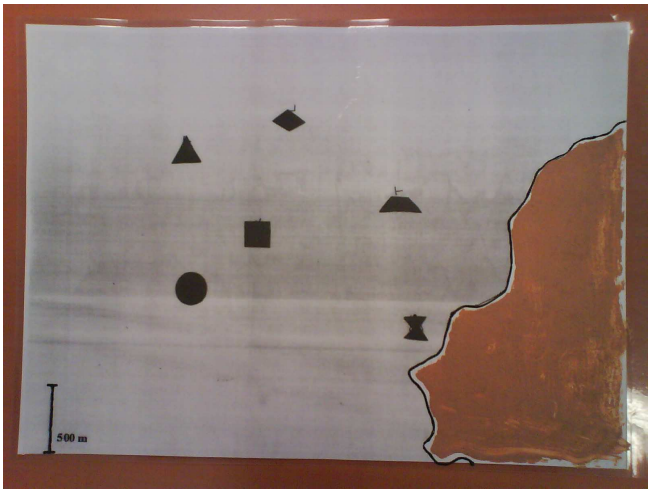


Figure 7.2 – Carte en relief utilisée pour l'expérience cartographique.

7.1.3 La description vocale (CVo)

La description de la carte réside dans l'énoncé de cinq relèvements en degrés cardinaux numériques (0 à 360°) et distances qui séparent le point central (*canoé*) des autres points de la carte (chaloupe, catamaran, etc, ...). Plus précisément, cette carte est un document « *Word* » que les sujets lisent via le lecteur d'écran « *Jaws* de la société *Freedom* @ » pour « *Windows* ». Ce logiciel, largement répandu dans la communauté informatique des personnes déficientes visuelles, est connu de tous les sujets. Les fonctions qu'ils utilisent ici sont les suivantes : la touche « *flèche bas* » pour entendre la phrase suivante, la « *touche flèche haut* » pour entendre à nouveau la phrase précédente. Ces fonctions permettent donc aux sujets « d'explorer » la description vocale (*cf.* figure 7.3).

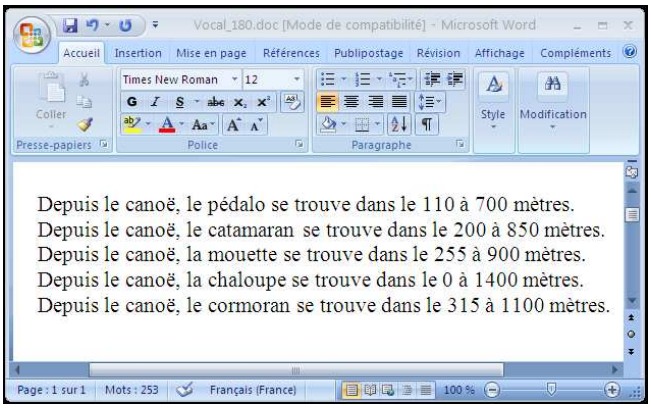


Figure 7.3 – La carte vocale écrite avec « *Word* » et lue avec « *Jaws* », logiciel de synthèse vocale dédié à la lecture d'écran pour le public non-voyant.

@www.freedomscientific.com

7.2 La familiarisation avec les outils

7.2.1 L'habitude des cartes en relief

Outre leur utilisation des cartes en relief au sein des instituts spécialisés, les sujets non-voyants participant à cette expérience sont membres de l'association Orion dont l'objet est la pratique de la voile adaptée au handicap visuel. Ces sujets naviguent donc à la voile pour leurs loisirs. Les sorties, plus ou moins régulières en fonction des sujets (*cf.* tableau 6.1 p.166), sont préparées à l'aide de cartes marines en relief. Cette pratique constitue un véritable entraînement cartographique (*cf.* figure 7.4). Finalement, les cartes tactiles maritimes sont familières des sujets participant à cette expérience.

Figure 7.4 – L'utilisation courante des cartes géographiques en relief.

7.2.2 Les descriptions verbales quotidiennes

Outre la participation à des cours d'instruction en locomotion riches en descriptions spatiales, les sujets privés de la vue se déplacent régulièrement en compagnie de voyants naturellement amenés à décrire l'environnement immédiat. Ainsi, le langage spatial courant (droite, gauche, devant, derrière,...) et le système métrique sont fréquemment sollicités. De plus, au cours de leurs navigations à la voile (hors expérience), les caps du bateau, les points de route et les azimuts des balises sont annoncés en degrés cardinaux numériques (0-360°) ou selon le principe de l'horloge (midi devant le voilier et six heures derrière) (*cf.* 5.4.1 p.160). Les sujets sont donc familiarisés avec le langage spatial maritime.

7.2.3 L'entrainement avec SeaTouch

A l'inverse des cartes en relief et des descriptions vocales, la plupart de nos sujets découvrent les cartes virtuelles de *SeaTouch* peu avant l'expérience. Afin de remédier à ce décalage, chaque sujet se livre à environ une heure de manipulation des cartes du logiciel. Cet entraînement préalable se déroule sur une carte spécifique comportant de la terre, de la mer, de la côte et trois balises (*cf.* figure 7.5). Il prend fin lorsque les sujets maîtrisent :
- la différence entre l'océan et la terre,
- le suivi de la côte,
- l'identification des balises.

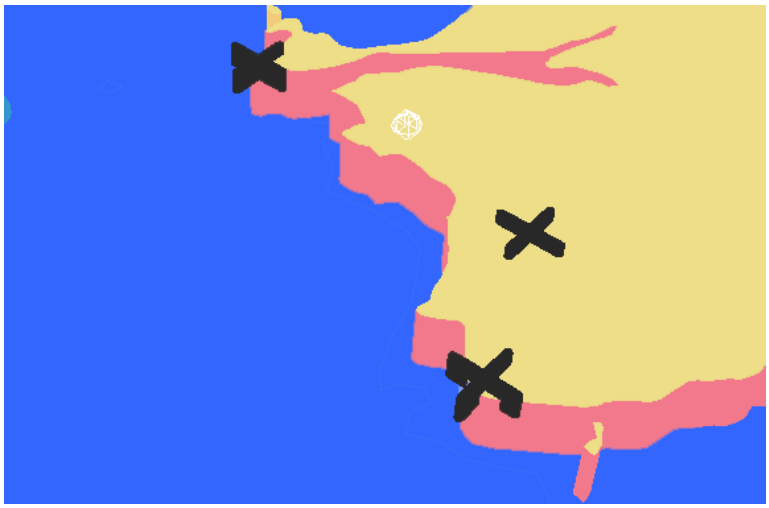


FIGURE 7.5 – La carte virtuelle de *SeaTouch* utilisée au cours de l'entraînement.

7.2.4 L'entraînement avec le rapporteur breton

A la suite de l'entraînement avec la carte avec *SeaTouch*, les sujets répondent à quelques questions suivant les deux référentiels spatiaux à l'aide du rapporteur breton (*cf.* § 6.3.3 p.171). De cette manière, ils apprennent à utiliser cet outil comme un moyen d'estimation des directions d'une part, et l'expérimentateur peut vérifier la bonne compréhension des sujets au cours de cet exercice d'autre part.

7.3 Le déroulement de l'expérience

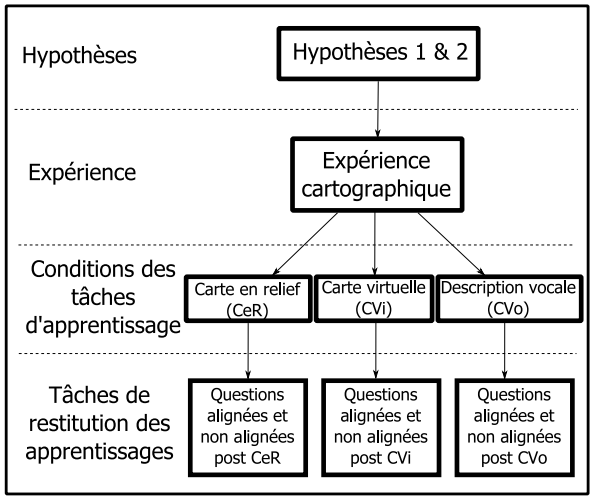


Figure 7.6 – Plan d'expérimentation de l'expérience cartographique.

Au cours de cette expérience d'exploration, chacun des six sujets se livre à des explorations selon trois conditions : carte en relief (CeR), carte virtuelle de SeaTouch (CVi) et description vocale (CVo) (*cf.* figure 7.6). Dans chacune de ces conditions, les sujets sont assis en face d'une carte et du rapporteur breton fixé sur la table au moment où l'expérimentateur énonce la consigne suivante :

« La tâche consiste à explorer un espace maritime comportant de l'eau, une falaise, de la terre et 6 points remarquables tous situés à la surface de la mer. A la suite d'une phase d'exploration libre, la carte est retirée et des questions sont posées. Pour répondre, vous utiliserez le rapporteur breton pour indiquer la direction dans laquelle se trouvent les objets demandés. Les questions peuvent être de deux types :

- *des questions alignées, par exemple « Vous êtes au Pingouin, où se trouve le Zodiac ? ». Dans ce cas, le rapporteur breton est aligné avec la carte, il vous est donc demandé de diriger le viseur dans la direction estimée de l'objet. Afin que l'expérimentateur puisse noter les valeurs, il est nécessaire d'attendre l'annonce OK pour relâcher l'instrument. »*
- *des questions non alignées, par exemple « vous êtes au Pingouin et faites face à l'Aigrette. dans quelle direction se trouve le Zodiac ? Dans ce cas, le rapporteur breton n'est pas aligné avec la carte mais avec votre position imaginée. Ici, l'outil de mesure se trouve sur l'axe pingouin-aigrette. Vous pouvez imaginer que vous êtes sur un voilier à la position du Pingouin et que vous faites cap sur l'Aigrette. L'objectif est de pointer la direction dans laquelle se trouve le Zodiac avec le rapporteur. »*

Une fois la consigne énoncée, les sujets disposent du temps qu'ils souhaitent pour explorer la carte.

7.4 Le recueil de données

Comme présenté dans le paragraphe 6.3.3 (p.171), nous recueillons des estimations de direction des différentes balises en réponse aux questions alignées et non alignées, et les *patterns* d'exploration haptique avec le *monitoring*.

Dans un premier temps nous analysons les connaissances construites à partir des réponses aux questions, ensuite nous nous intéressons aux stratégies d'exploration haptique.

Cette méthodologie spécifique ne s'applique que pour l'expérience cartographique.

Chapitre 8

Résultats de l'expérience de cartographie

Entre ce chapitre et le précédent, nos six marins aveugles ont réalisé l'expérience cartographique en *condition d'exploration d'une carte en relief* (*CeR*), en *condition d'exploration d'une carte virtuelle de* SeaTouch (*CVi*) et en *condition d'exploration d'une description vocale* (*CVo*). Ils ont ensuite accepté de répondre à nos questions alignées et non alignées. De là, nous avons extrait les erreurs angulaires (Ea) du niveau des directions, les aires des triangles d'erreur (Ate) et les erreurs de distance (Dte) du niveau des localisations, et les coefficients de corrélation (r) et les index de distorsions (DI) du niveau des configurations. Rappelons notre hypothèse selon laquelle **la carte de SeaTouch permet aux marins non-voyants de construire une représentation spatiale d'une précision équivalente à celles construites à partir d'une carte en relief ou d'une description vocale (hypothèse 1)**. D'un point de vue opérationnel, si les performances obtenues avec SeaTouch ne sont pas significativement inférieures aux performances réalisées avec la carte en relief d'une part, et aux performances réalisées à partir des descriptions vocales d'autre part, alors l'hypothèse 1 se vérifie.

Nous procédons ici au traitement statistique des données issues des trois niveaux de représentation spatiale décrits dans la méthodologie générale (*cf.* §6.4 p.171). Nos échantillons de résultats ne respectant pas la loi normale, nous utilisons le test statistique non paramétrique de comparaison appariée de Wilcoxon. Nous adoptons un seuil de signification à $p<.05$.

Tout d'abord nous comparons les représentations spatiales construites en fonction de l'**alignement** des questions toute condition et tout sujet confondus. Ensuite nous nous intéressons à ces représentations en fonction des **conditions d'exploration** tout alignement et tout sujet confondus. Nous précisons alors les interactions entre l'**alignement** et les **conditions d'exploration**. Nous approfondissons alors ces résultats en comparant les conditions d'exploration et les interactions entre l'alignement et les conditions d'exploration pour **chaque sujet**. Finalement, nous présentons les performances de chaque sujet en condition d'exploration des cartes virtuelles de SeaTouch en fonction de l'alignement. Ce niveau de détail est utilisé dans le chapitre 9.4 pour apprécier l'efficacité des différentes stratégies

d'exploration.

8.1 L'alignement

Existe-t-il des différences entre les réponses aux questions alignées et non alignées toute condition d'exploration et tout sujet confondus ?

8.1.1 Niveau des directions

En situation alignée, les erreurs angulaires (Ea) issues des estimations de directions sont de 15° (± 14) alors qu'en situation non alignée, elles sont de 28° (± 24) (*cf.* figure 8.1).

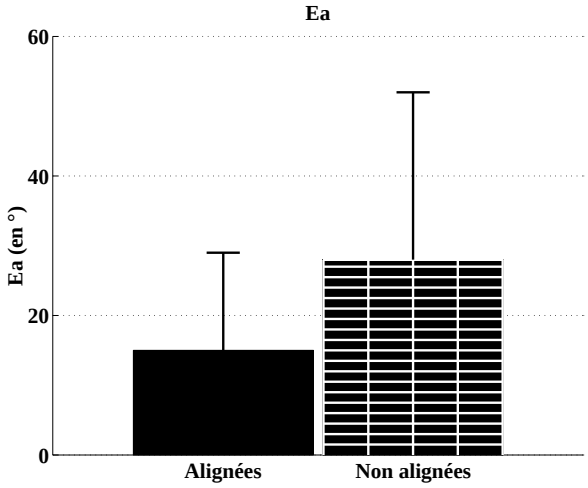


Figure 8.1 – Moyennes et Ecart-types des erreurs angulaires (Ea) en degrés en fonction de l'alignement.

L'analyse statistique révèle une différence significative (Z=8.56) entre les réponses aux questions alignées et non alignées.

En résumé, au niveau des directions, les performances obtenues lors des réponses aux questions alignées sont significativement meilleures que celles issues des réponses aux questions non alignées.

8.1.2 Niveau des localisations

8.1.2.1 Les erreurs de distance (Dte)

En situation alignée, les Dte sont de 1,3 km (± 4,0), alors qu'en situation non alignée, elles sont de 2,1 km (± 4,5) (*cf.* figure 8.2).

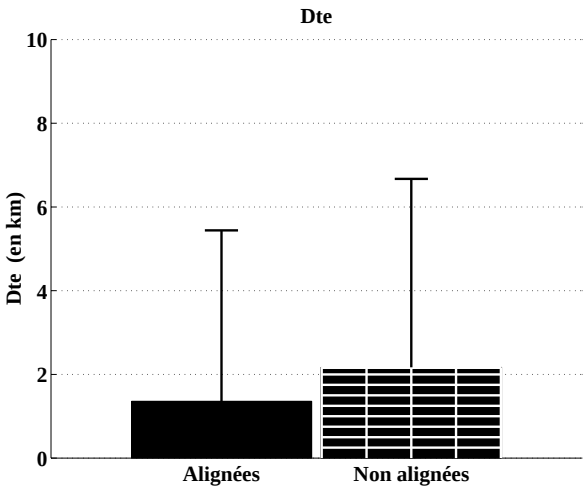


FIGURE 8.2 – Moyennes et Ecart-types des erreurs de distances (Dte) en km en fonction de l'alignement.

On observe une différence significative (Z=4.88) entre les réponses aux questions alignées et non alignées.

Les Dte issues des réponses aux questions alignées sont significativement inférieures à celles issues des questions non alignées.

8.1.2.2 Les aires des triangles d'erreurs (Ate)

En situation alignée, les Ate sont de 2,3 km^2 (± 4,0) alors qu'en situation non alignée, elles sont de 3,2 km^2 (± 3,5) (*cf.* figure 8.3).

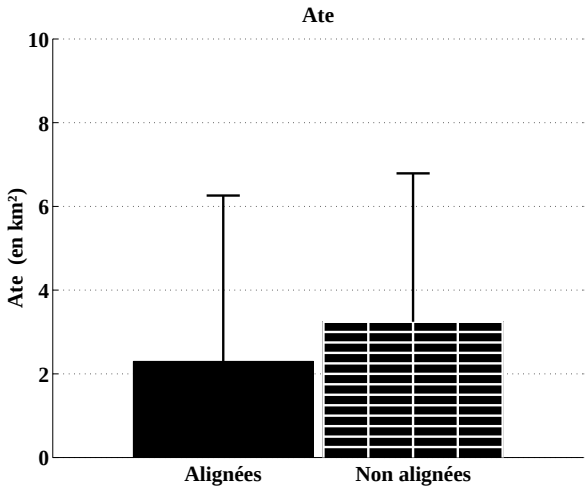


FIGURE 8.3 – Moyennes et Ecart-types des aires des triangles d'erreurs (Ate) en km^2 en fonction de l'alignement.

Il existe une différence significative (Z=2.14) entre les réponses aux questions alignées et non alignées.

De la même manière que lors de l'analyse statistique des Dte, les Ate obtenues lors des réponses aux questions alignées sont significativement inférieures à celles issues des réponses aux questions non alignées.

En résumé, au niveau des localisations, les performances en situation alignée sont meilleures que les performances en situation non alignée.

8.1.3 Niveau des configurations

8.1.3.1 Le coefficient de corrélation (r)

En situation alignée, les r sont de 0,76 (± 0,26), alors qu'en situation non alignée, ils sont de 0,55 (± 0,21) (*cf.* figure 8.4).

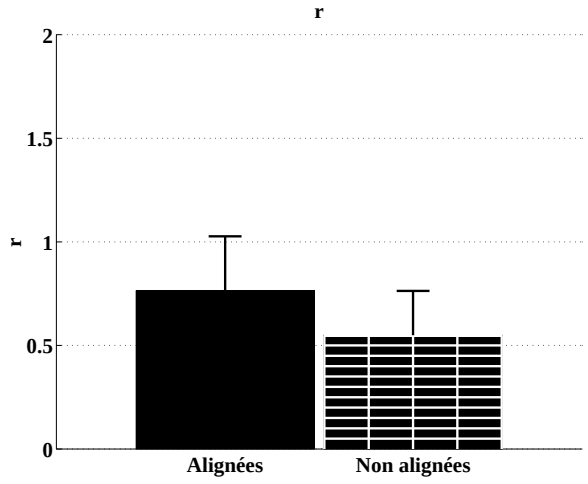


FIGURE 8.4 – Moyennes et Ecart-types du coefficient corrélation (r) en fonction de l'alignement.

Lors de l'analyse statistique, la comparaison des r alignés et non alignés révèle l'existence d'une différence significative (Z=2.74).

Les performances obtenues lors des réponses aux questions alignées sont significativement meilleures que celles issues des réponses des questions non alignées.

8.1.3.2 La distorsion (DI)

En situation alignée, les DI sont de 53 (± 26) alors qu'ils sont de 79 (± 16) en situation non alignée (*cf.* figure 8.5).

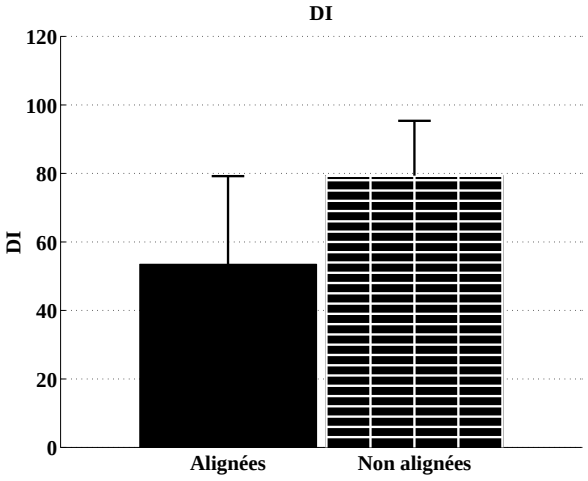


FIGURE 8.5 – Moyennes et Ecart-types de l'index de distorsion en fonction de l'alignement.

Il existe une différence significative (Z=3.28) entre les réponses aux questions alignées et non alignées.

De la même manière que pour la variable r, les DI obtenues lors des réponses aux questions alignées sont significativement meilleures que celles issues des questions non alignées.

En résumé, au niveau des configurations, les performances en situation alignée sont donc meilleures que les performances obtenues en situation non alignée.

8.1.4 Synthèse sur l'alignement

Niveaux	Directions	Localisations		Configurations	
Variables	Ea	Dte	Ate	r	DI
Différences à p<.05 selon **Wilcoxon**	**Alignées < Non Alignées**	**Alignées < Non Alignées**	**Alignées < Non Alignées**	**Alignées > Non Alignées**	**Alignées < Non Alignées**

Figure 8.6 – Synthèse des comparaisons des réponses aux questions alignées et non alignées aux niveaux des directions, des localisations et des configurations selon le test statistique de Wilcoxon à p<.05. Nous rappelons que plus la variable r est grande, meilleures sont les réponses.

Finalement, toutes les variables de tous les niveaux d'analyse traduisent de meilleurs résultats lors des réponses aux questions alignées que lors des réponses aux questions non alignées (*cf.* figure 8.6).

8.2 Les conditions d'exploration

Existe-t-il des différences entre les performances spatiales issues des différentes conditions d'exploration tout sujet et tout alignement confondus ?

8.2.1 Niveau des directions

En condition d'exploration de la carte en relief (CeR) les Ea sont de 21° (± 20), en condition d'exploration de la carte virtuelle de SeaTouch (CVi) les Ea sont de 22° (± 21), et en condition d'exploration de la description vocale (CVo), les Ea sont de 22° (± 21) (*cf.* figure 8.7).

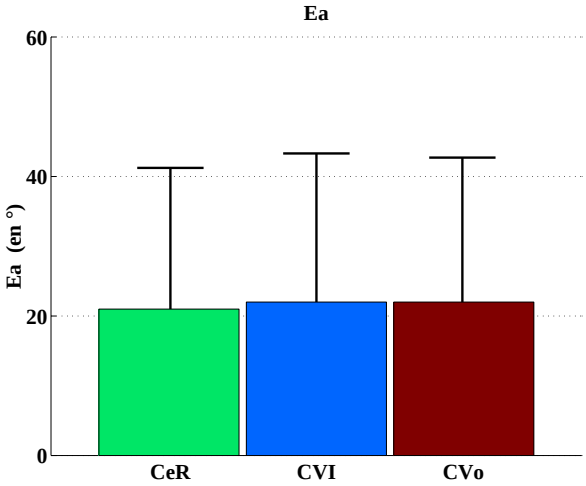


Figure 8.7 – Moyennes et Ecart-types des Ea en degrés en fonction des conditions d'exploration (CeR = Condition d'exploration d'une carte en relief ; CVi = Condition d'exploration d'une carte virtuelle de SeaTouch ; CVo = Condition d'exploration d'une description vocale).

La comparaison des Ea en CeR et en CVi ne révèle pas de différence significative (Z=0.25). Il en est de même, pour les Ea en CeR et en CVo (Z=1.02) et les Ea en CVi et en CVo (Z=1.17).

En résumé, au niveau des directions, les performances obtenues avec les cartes virtuelles de SeaTouch (CVi) sont équivalentes à celles issues de la carte en relief (CeR) ou de la description vocale (CVo).

8.2.2 Niveau des localisations

8.2.2.1 Les erreurs de distance (Dte)

En CeR les Dte sont de 1,0 km (± 2,3), en Cvi elles sont de 1,5 km (± 3,3) et en CVo elles sont de 2,6 km (± 5,4) (*cf.* figure 8.8).

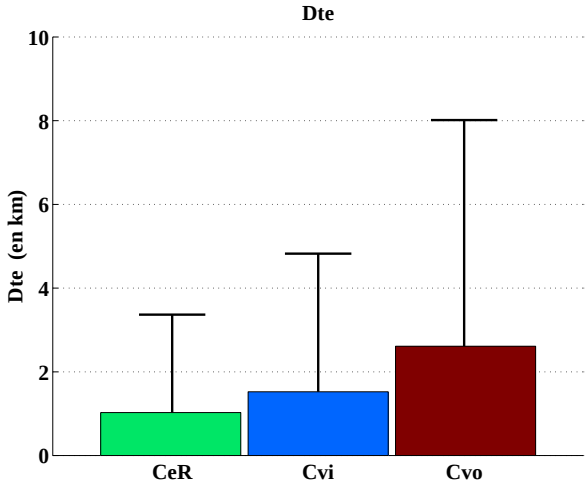


FIGURE 8.8 – Moyennes et Ecart-types des erreurs de distance (Dte) en km en fonction des conditions d'exploration.

L'analyse statistique ne révèle pas de différence significative (Z=1.66) entre les Dte obtenues en CeR et CVi. Par contre, les Dte issues des CeR et CVi sont significativement inférieures (respectivement Z=2.67 et Z=1.98) à celles issues des CVo.

Les performances obtenues en CeR et CVi sont donc équivalentes entre elles d'une part, et supérieures à celles issues des CVo.

8.2.2.2 Les aires des triangles d'erreurs (Ate)

Les Ate obtenues en CeR sont de 1,2 km^2 (± 1,7), celles obtenues en CVi sont de 2,0 km^2 (± 3,1) et celles calculées en CVo sont de 4,2 km^2 (± 3,3) (*cf.* figure 8.9).

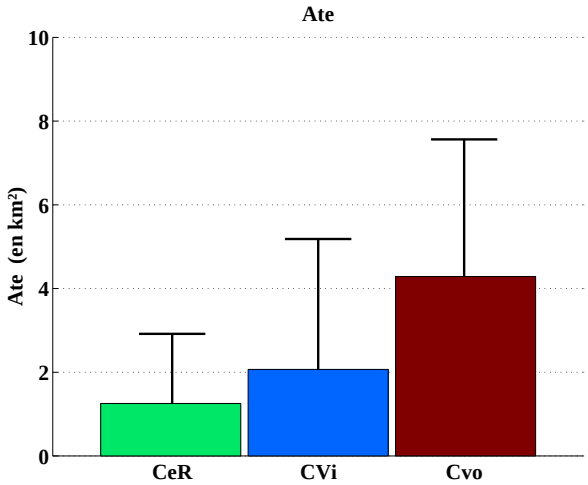


FIGURE 8.9 – Moyennes et Ecart-types des aires des triangles (Ate) d'erreur en km^2 en fonction des conditions d'exploration.

L'analyse statistique ne révèle pas de différence significative (Z=0.70) entre les Ate obtenues en CeR et en CVi. Par contre, les Ate issues des CeR et CVi sont significativement inférieures (respectivement Z=2.35 et Z=2.12) à celles calculées en CVo.

Les performances obtenues en CeR et CVi sont donc équivalentes entre elles d'une part, et meilleures que celles issues des CVo d'autre part.

En résumé, au niveau des localisations, les analyses des variables montrent que les performances obtenues avec la carte de SeaTouch (CVi) sont équivalentes à celles issues de la carte en relief (CeR) d'une part, et sont meilleures que celles issues de la description vocale (CVo) d'autre part.

8.2.3 Niveau des configurations

8.2.3.1 Le coefficient de corrélation (r)

Les r obtenus en CeR sont de 0,69 (± 0,26), ceux issus de CVi sont de 0,65 (± 0,27), et ceux calculés en CVo sont de 0,57 (± 0,25) (*cf.* figure 8.10).

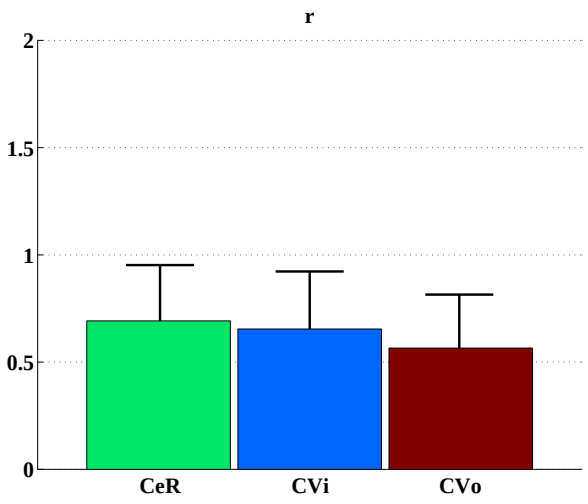


Figure 8.10 – Moyennes et Ecart-types des coefficients de corréliation r en fonction des conditions d'exploration.

Bien que les valeurs de r issues de CVo soient plus faibles que celles obtenues en CVi, qui sont elle-mêmes plus faibles que celles recueillies en CeR, aucune différence n'apparaît. En effet, les comparaisons entre Cer et Cvi (Z=0.24), entre CeR et CVo (Z=0.86) et entre Cvi et Cvo (Z=0.63) ne présentent aucune différence significative.

8.2.3.2 La distorsion (DI)

En CeR, les DI sont de 63 (± 26). En CVi, elles sont de 67 (± 24). En CVo, elles sont de 75 (± 24) (*cf.* figure 8.11).

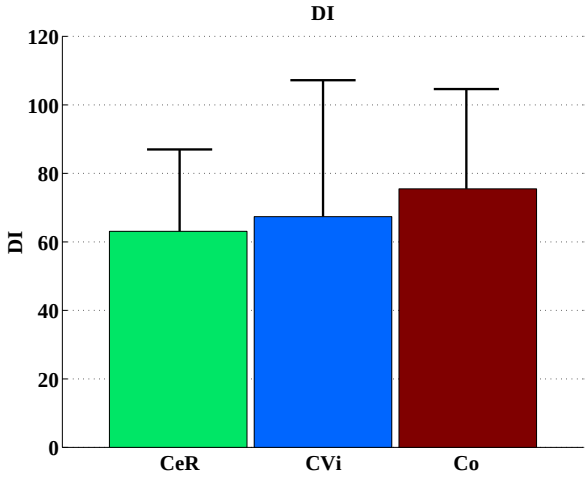


Figure 8.11 – Moyennes et Ecart-types de l'index de distorsion (DI) en fonction des conditions d'exploration.

Aucune différence significative n'existe entre les DI en Cer, Cvi et CVo. Ainsi, les comparaisons Cer-Cvi (Z=0.08), CeR-CVo (Z=0.94) et CVi-CVo (Z=0.78) ne montrent pas de différences significatives.

En résumé, au niveau des configurations, les variables r et DI ne traduisent aucune différence dans les performances obtenues avec les cartes de SeaTouch (CVi), celles obtenues avec la carte en relief (CeR) et celles issues de la description vocale (CVo).

8.2.4 Synthèse sur les conditions d'exploration

Niveaux	Directions	Localisations		Configurations	
Variables	Ea	Dte	Ate	r	DI
Différences à p<.05 selon **Wilcoxon**	**CeR = CVi**	**CeR = CVi**	**CeR = CVi**	**CeR = CVi**	**CeR = CVi**
	CeR = CVo	**CeR < CVo**	**CeR < CVo**	**CeR = CVo**	**CeR = CVo**
	CVi = CVo	**CVi < CVo**	**CVi < CVo**	**CVi = CVo**	**CVi = CVo**

Figure 8.12 – Synthèse des comparaisons des performances selon les conditions d'exploration aux niveaux des directions, des localisations et des configurations selon le test statistique de Wilcoxon à p<.05. Nous rappelons que les variables Ea, Ate et Dte et DI mesurent des erreurs. « CVi<Cvo » signifie donc que les performances obtenues en CVi sont meilleures que celles recueillies en CVo.

Finalement, il n'existe pas de différence significative entre les résultats issus des explorations de la carte virtuelle de SeaTouch (CVi) et de la carte en relief (CeR). Le niveau des localisations présente des différences significatives entre les conditions d'exploration. Ici les cartes de SeaTouch (CVi) et celles en relief (CeR) révèlent de meilleures performances spatiales que celles issues des descriptions vocales (CVo). Les autres niveaux d'analyse ne révèlent pas de différence entre les conditions d'exploration (*cf.* figure 8.12).

8.3 Les interactions entre les conditions et l'alignement

Au regard des précédents résultats, il existe peu de différences entre les conditions d'exploration mais une importance influence de l'alignement des questions. Cependant, existerait-il des interactions entre les conditions d'exploration et l'alignement.

8.3.1 Niveau des directions

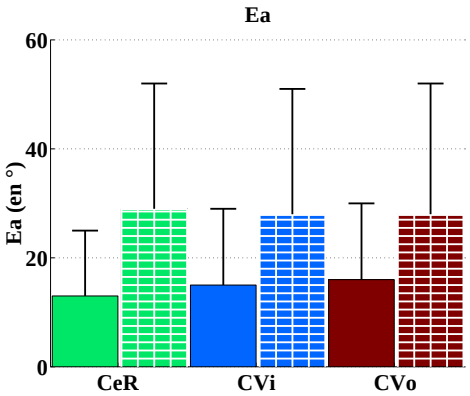


Figure 8.13 – Moyennes et Ecart-types des Ea en degrés en fonction des conditions et de l'alignement. Les barres pleines représentent les Ea alignées alors que les barres quadrillées correspondent aux Ea non alignées.

En CeR, les Ea sont de 13° (± 12) en situation alignée et de 29° (± 23) en situation non alignée. En CVi, les Ea sont de 15° (± 14) en situation alignée et de 28° (± 23) en situation non alignée. En CVo, les Ea sont de 16° (± 14) en situation alignée et de 28° (± 24) en situation non alignée (*cf.* figure 8.13).

Aucune différence significative n'apparaît entre les trois conditions ni en situation alignée, ni en situation non alignée.

8.3.2 Niveau des localisations

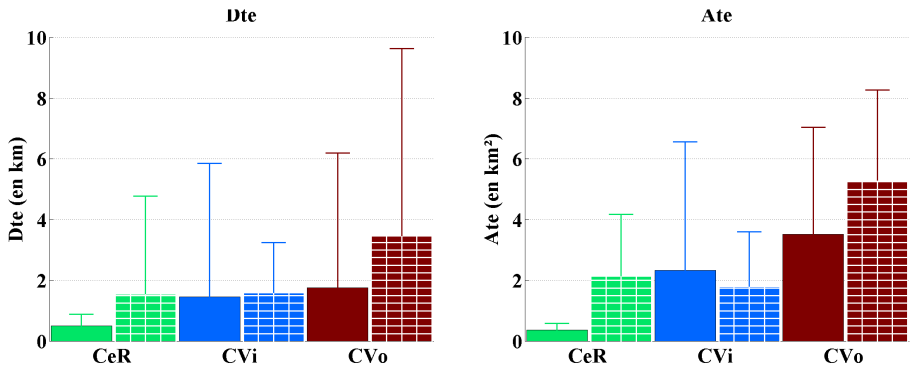


Figure 8.14 – Moyennes et Ecart-types des Dte et Ate en fonction des conditions et de l'alignement. Les barres pleines représentent les valeurs alignées alors que les barres quadrillées correspondent aux valeurs non alignées.

8.3.2.1 Les erreurs de distances (Dte)

En CeR, les Dte sont de 0,5 km (± 0,4) en situation alignée et de 1,5 km (± 3,2) en situation non alignée. En CVi, les Dte sont de 1,5 km (± 4,4) en situation alignée et de 1,6 km (± 1,7) en situation non alignée. En CVo, les Dte sont de 1,8 km (± 4,4) en situation alignée et de 3,5 km (± 6,2) en situation non alignée (*cf.* figure 8.14). En situation alignée, l'analyse statistique révèle que les performances en CeR sont significativement meilleures (Z=2.28) qu'en CVo. Aucune différence sgnificative n'apparaît par ailleurs.

8.3.2.2 Les triangles d'erreur (Ate)

En CeR, les Ate sont de 0,4 km^2 (± 0,2) en situation alignée et de (2,1 km^2 ± 2,0) en situation non alignée. En CVi, les Ate sont de 2,3 km^2 (± 4,2) en situation alignée et de 1,8 km^2 (± 1,8) en situation non alignée. En CVo, les Ate sont de 3,3 km^2 (± 3,5) en situation alignée et de 5,3 km^2 (± 3,0) en situation non alignée (*cf.* figure 8.14).

En situation alignée, l'analyse statistique révèle que les performances en CeR sont significativement meilleures (Z=1.99) qu'en CVo. Aucune différence n'apparaît par ailleurs.

8.3.3 Niveau des configurations

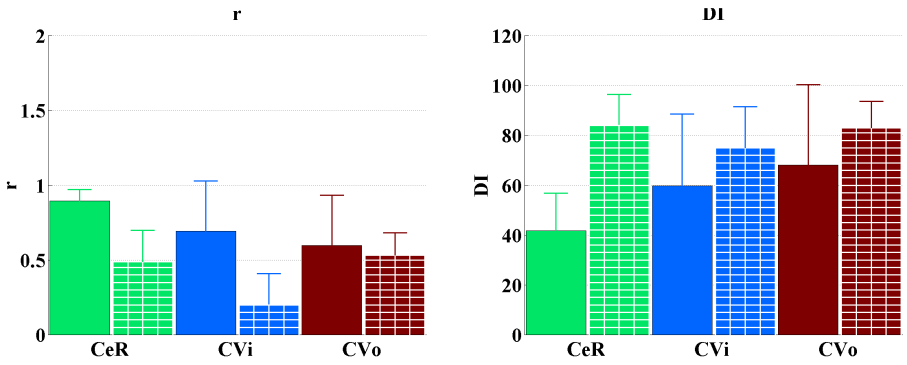


Figure 8.15 – Moyennes et Ecart-types des r et DI en fonction des conditions et de l'alignement. Les barres pleines représentent les valeurs alignées alors que les barres quadrillées correspondent aux valeurs non alignées.

8.3.3.1 Le coefficient de corrélation (r)

En CeR, les r sont de 0,86 (± 0,07) en situation alignée et de 0,49 (± 0,20) en situation non alignée. En CVi, les r sont de 0,69 (± 0,34) en situation alignée et de 0,62 (± 0,20) en situation non alignée. En CVo, les r sont de 0,60 (± 0,33) en situation alignée et de 0,53 (± 0,15) en situation non alignée (*cf.* figure 8.15). Aucune différence significative n'apparaît.

8.3.3.2 L'index de distorsion (DI)

En CeR, les DI sont de 42 (± 15) en situation alignée et de 84 (± 12) en situation non alignée. En CVi, les DI sont de 60 (± 29) en situation alignée et de 75 (± 17) en situation non alignée. En CVo, les DI sont de 68 (± 32) en situation alignée et de 83 (± 11) en situation non alignée (*cf.* figure 8.15). Aucune différence significative n'apparaît.

8.3.4 Synthèse sur les conditions et l'alignement

8.3.4.1 Les conditions en situation alignée

Questions Alignées					
Niveaux	Directions	Localisations		Configurations	
Variables	Ea	Dte	Ate	r	DI
Différences à p<.05 selon **Wilcoxon**	**CeR = CVi (Z=0.44)**	**CeR = CVi (Z=0.73)**	**CeR = CVi (Z=0.73)**	**CeR = Cvi (Z=0.75)**	**CeR = CVi (Z=0.31)**
	CeR = CVo (Z=1.82)	**CeR < CVo (Z=2.28)**	**CeR < CVo (Z=1.99)**	**CeR = Cvo (Z=1.57)**	**CeR = Cvo (Z=1.36)**
	CVi = CVo (Z=1.17)	**CVi = CVo (Z=1.26)**	**CVi = CVo (Z=0.73)**	**CVi = Cvo Z=(0.10)**	**CVi = Cvo Z=(0.10)**

Figure 8.16 – Synthèse des comparaisons des performances selon les conditions d'exploration en fonction des réponses aux questions alignées aux niveaux des directions, des localisations et des configurations selon le test statistique de Wilcoxon à p<.05. Nous rappelons que les variables Ea, Ate et Dte et DI mesurent des erreurs.

Face aux questions alignées, les distances (Dte) et les aires des triangles d'erreur (Ate) du niveau des localisations révèlent une supériorité de la carte en relief (CeR) sur la description vocale (CVo). Aucune autre différence n'apparaît (*cf.* figure 8.16).

8.3.4.2 Les conditions en situation non alignée

Questions Non Alignées					
Niveaux	Directions	Localisations		Configurations	
Variables	Ea	Dte	Ate	r	DI
Différences à p<.05 selon **Wilcoxon**	**CeR = CVi (Z=0.03)**	**CeR = CVi (Z=1.42)**	**CeR = CVi (Z=0.31)**	**CeR = CVi (Z=0.31)**	**CeR = CVi (Z=0.75)**
	CeR = CVo (Z=0.44)	**CeR = CVo (Z=1.42)**	**CeR = CVo (Z=0.17)**	**CeR = CVo (Z=0.31)**	**CeR = CVo (Z=0.10)**
	CVi = CVo (Z=0.14)	**CVi = CVo (Z=1.46)**	**CVi < CVo (Z=1.99)**	**CVi = CVo Z=(1.57)**	**CVi = CVo Z=(1.57)**

Figure 8.17 – Synthèse des comparaisons des performances selon les conditions d'exploration en fonction des réponses aux questions non alignées aux niveaux des directions, des localisations et des configurations selon le test statistique de Wilcoxon à p<.05. Nous rappelons que les variables Ea, Ate et Dte et DI mesurent des erreurs.

Face aux questions non alignées, seules les aires des triangles d'erreur (Ate) du niveau des localisations révèlent une supériorité de la carte virtuelle de SeaTouch (CVi) sur la description vocale. Aucune autre différence n'apparaît (*cf.* figure 8.17).

8.3.4.3 L'alignement des questions en CeR

CeR					
Niveaux	Directions	Localisations		Configurations	
Variables	Ea	Dte	Ate	r	DI
Différences à p<.05 selon **Wilcoxon**	**Alignées < Non Alignées (Z=5.49)**	**Alignées < Non Alignées (Z=3.61)**	**Alignées < Non Alignées (Z=3.69)**	**Alignées > Non Alignées (Z=2.20)**	**Alignées < Non Alignées (Z=2.20)**

Figure 8.18 – Synthèse des comparaisons des performances alignées et non alignées construites avec la carte en relief aux niveaux des directions, des localisations et des configurations selon le test statistique de Wilcoxon à p<.05. Nous rappelons que les variables Ea, Ate et Dte et DI mesurent des erreurs.

Lors de l'exploration de la carte en relief, les variables des trois niveaux révèlent de meilleures performances en situation alignée à l'unanimité (*cf.* figure 8.18).

8.3.4.4 L'alignement des questions en CVi

CVi					
Niveaux	Directions	Localisations		Configurations	
Variables	Ea	Dte	Ate	r	DI
Différences à p<.05 selon **Wilcoxon**	**Alignées < Non Alignées (Z=4.94)**	**Alignées < Non Alignées (Z=2.56)**	**Alignées < Non Alignées (Z=2.36)**	**Alignées = Non Alignées (Z=0.73)**	**Alignées = Non Alignées (Z=0.94)**

Figure 8.19 – Synthèse des comparaisons des performances alignées et non alignées construites avec la carte virtuelle de SeaTouch aux niveaux des directions, des localisations et des configurations selon le test statistique de Wilcoxon à p<.05. Nous rappelons que les variables Ea, Ate et Dte et DI mesurent des erreurs.

Lors de l'exploration de la carte virtuelle de SeaTouch, les erreurs angulaires du niveau des directions et les distances et triangles d'erreur du niveau des localisations révèlent de meilleures performances en situation alignée. Cependant aucune différence n'apparaît au niveau des configurations (*cf.* figure 8.19).

8.3.4.5 L'alignement des questions en CVo

CVo					
Niveaux	Directions	Localisations		Configurations	
Variables	Ea	Dte	Ate	r	DI
Différences à p<.05 selon **Wilcoxon**	**Alignées < Non Alignées (Z=4.30)**	**Alignées < Non Alignées (Z=2.16)**	**Alignées = Non Alignées (Z=1.92)**	**Alignées = Non Alignées (Z=0.31)**	**Alignées = Non Alignées (Z=0.73)**

Figure 8.20 – Synthèse des comparaisons des performances alignées et non alignées construites avec la description vocale aux niveaux des directions, des localisations et des configurations selon le test statistique de Wilcoxon à p<.05.Nous rappelons que les variables Ea, Ate et Dte et DI mesurent des erreurs.

Lors de l'exploration de la description vocale, les erreurs angulaires du niveau des directions et les erreurs de distance du niveau des localisations révèlent de meilleures performances en situation alignée. Cependant aucune différence n'apparaît aux regards des aires des triangles d'erreur et des variables du niveau des configurations (*cf.* figure 8.20).

8.4 Les conditions en fonction des sujets

Niveaux	Directions	Localisations	
Variables	Ea	Dte	Ate
Sujet 1	CeR = CVi (Z=1.50)	CeR = CVi (Z=0.63)	CeR = CVi (Z=0.63)
	CeR = CVo (Z=0.16)	CeR = CVo (Z=0.16)	CeR = CVo (Z=0.86)
	CVi = CVo (Z=1.10)	CVi = CVo (Z=0.16)	CVi = CVo Z=(1.02)
Sujet 2	CeR > CVi (Z=2.48)	CeR = CVi (Z=0.47)	CeR = CVi (Z=1.80)
	CeR = CVo (Z=1.35)	CeR < CVo (Z=2.35)	CeR = CVo (Z=1.80)
	CVi < CVo (Z=3.07)	CVi < CVo (Z=2.19)	CVi < CVo (Z=2.59)
Sujet 3	CeR = CVi (Z=1.60)	CeR = CVi (Z=1.26)	CeR = CVi (Z=1.09)
	CeR = CVo (Z=0.06)	CeR = CVo (Z=0.78)	CeR = CVo (Z=0.86)
	CVi < CVo (Z=2.92)	CVi < CVo (Z=2.35)	CVi < CVo (Z=2.35)
Sujet 4	CeR = CVi (Z=1.42)	CeR = CVi (Z=0.78)	CeR = CVi (Z=1.64)
	CeR = CVo (Z=0.13)	CeR = CVo (Z=0.31)	CeR = CVo (Z=0.63)
	CVi = CVo (Z=1.29)	CVi = CVo (Z=0.16)	CVi = CVo Z=(0.24)
Sujet 5	CeR = CVi (Z=1.26)	CeR = CVi (Z=1.65)	CeR = CVi (Z=0.08)
	CeR = CVo (Z=0.96)	CeR = CVo (Z=0.63)	CeR = CVo (Z=0.86)
	CVi = CVo (Z=1.78)	CVi = CVo (Z=0.24)	CVi = CVo Z=(0.58)
Sujet 6	CeR = CVi (Z=0.13)	CeR < CVi (Z=2.20)	CeR = CVi (Z=1.33)
	CeR = CVo (Z=1.23)	CeR < CVo (Z=2.20)	CeR = CVo (Z=1.02)
	CVi = CVo (Z=1.49)	CVi = CVo (Z=0.94)	CVi = CVo Z=(0.16)

Figure 8.21 – Tableau de Synthèse des différences significatives mises à jour avec le test statistique de Wilcoxon à $p<.05$ entre la carte virtuelle (CVi), la carte en relief (CeR) et la description vocale (CVo) par sujet. Nous rappelons que nous mesurons des erreurs, une valeur plus faible correspond donc à une meilleure représentation.

Cette analyse des conditions d'exploration par sujet n'utilise que les variables des niveaux des directions et des localisations car les r et DI du niveau des configurations ne sont pas assez nombreuses (deux par sujet) pour réaliser une comparaison statistique (*cf.* figure 8.21).

8.4.1 Niveau des directions

Le sujet 2 présente le couple de résultats CeR est supérieure à CVi (Z=2.48) et CVi est inférieure à CVo (Z=3.07).

Le sujet 3 présente le résultat CVi est inférieure à CVo (Z=2.92).

Aucune autre différence significative n'apparaît à ce niveau.

8.4.2 Niveau des localisations

Le sujet 2 présente le couple de résultats CeR est inférieure à CVo (Z=2.35) et CVi est inférieure à CVo (Z=2.19) pour les Dte et le résultat CVi est inférieure à CVo (Z=2.59) pour les Ate.

Le sujet 3 présente les résultats CVi est inférieure à CVo pour les Dte (Z=2.35) et les Ate (Z=2.35).

Le sujet 6 présente le couple de résultats CeR est inférieure à CVi (Z=2.20) et CeR est inférieure à CVo (Z=2.20) pour les Dte.

Aucune autre différence significative n'apparaît à ce niveau.

En résumé, les deux niveaux d'analyse montrent que les sujets 2 et 3 présentent de meilleures performances à la suite de l'exploration d'une carte virtuelle de SeaTouch qu'à la suite de celle d'une description vocale.

8.5 Les conditions et l'alignement en fonction des sujets

Questions Alignées			
Niveaux	Directions	Localisations	
Variables	Ea	Dte	Ate
Sujet 1	CeR = CVi (Z=0.10)	CeR = CVi (Z=0.52)	CeR = CVi (Z=0.10)
	CeR = CVo (Z=0.15)	CeR = CVo (Z=1.36)	CeR = CVo (Z=0.73)
	CVi = CVo (Z=0.63)	CVi = CVo (Z=1.57)	CVi = CVo Z=(0.94)
Sujet 2	CeR > CVi (Z=2.37)	CeR = CVi (Z=0.94)	CeR > CVi (Z=1.99)
	CeR = CVo (Z=0.46)	CeR = CVo (Z=1.15)	CeR = CVo (Z=0.73)
	CVi < CVo (Z=2.06)	CVi = CVo (Z=1.15)	CVi = CVo (Z=1.78)
Sujet 3	CeR = CVi (Z=0.59)	CeR = CVi (Z=0.94)	CeR = CVi (Z=0.73)
	CeR = CVo (Z=0.41)	CeR = CVo (Z=1.78)	CeR = CVo (Z=1.57)
	CVi = CVo (Z=1.94)	CVi < CVo (Z=2.20)	CVi < CVo (Z=2.20)
Sujet 4	CeR = CVi (Z=1.67)	CeR < CVi (Z=1.99)	CeR = CVi (Z=1.78)
	CeR = CVo (Z=1.54)	CeR = CVo (Z=1.78)	CeR = CVo (Z=1.15)
	CVi = CVo (Z=0.40)	CVi = CVo (Z=0.52)	CVi = CVo Z=(0.10)
Sujet 5	CeR = CVi (Z=0.59)	CeR = CVi (Z=0.10)	CeR = CVi (Z=0.10)
	CeR = CVo (Z=0.02)	CeR = CVo (Z=0.10)	CeR = CVo (Z=0.31)
	CVi = CVo (Z=1.02)	CVi = CVo (Z=0.10)	CVi = CVo Z=(0.10)
Sujet 6	CeR = CVi (Z=0.85)	CeR = CVi (Z=1.36)	CeR = CVi (Z=0.52)
	CeR = CVo (Z=1.54)	CeR < CVo (Z=1.99)	CeR = CVo (Z=0.73)
	CVi = CVo (Z=1.11)	CVi = CVo (Z=1.15)	CVi = CVo Z=(0.73)

Questions Non alignées			
Niveaux	Directions	Localisations	
Variables	Ea	Dte	Ate
Sujet 1	CeR = CVi (Z=1.80)	CeR = CVi (Z=1.36)	CeR = CVi (Z=0.73)
	CeR = CVo (Z=0.37)	CeR = CVo (Z=0.94)	CeR = CVo (Z=1.36)
	CVi = CVo (Z=0.89)	CVi = CVo (Z=0.73)	CVi = CVo Z=(1.15)
Sujet 2	CeR = CVi (Z=0.15)	CeR = CVi (Z=0.10)	CeR = CVi (Z=0.73)
	CeR = CVo (Z=1.45)	CeR < CVo (Z=2.20)	CeR < CVo (Z=1.99)
	CVi < CVo (Z=2.24)	CVi < CVo (Z=1.99)	CVi = CVo (Z=1.78)
Sujet 3	CeR = CVi (Z=1.67)	CeR = CVi (Z=0.94)	CeR = CVi (Z=1.78)
	CeR = CVo (Z=0.32)	CeR = CVo (Z=0.10)	CeR = CVo (Z=0.10)
	CVi < CVo (Z=2.34)	CVi = CVo (Z=1.36)	CVi = CVo (Z=1.36)
Sujet 4	CeR = CVi (Z=0.76)	CeR = CVi (Z=1.15)	CeR = CVi (Z=0.31)
	CeR = CVo (Z=1.24)	CeR = CVo (Z=0.73)	CeR = CVo (Z=0.31)
	CVi = CVo (Z=1.50)	CVi = CVo (Z=0.31)	CVi = CVo Z=(0.31)
Sujet 5	CeR = CVi (Z=0.94)	CeR < CVi (Z=1.99)	CeR = CVi (Z=0.10)
	CeR = CVo (Z=1.11)	CeR = CVo (Z=0.94)	CeR = CVo (Z=0.94)
	CVi = CVo (Z=1.46)	CVi = CVo (Z=0.31)	CVi = CVo Z=(0.94)
Sujet 6	CeR = CVi (Z=0.68)	CeR = CVi (Z=1.57)	CeR = CVi (Z=1.15)
	CeR = CVo (Z=0.37)	CeR = CVo (Z=1.15)	CeR = CVo (Z=0.73)
	CVi = CVo (Z=0.98)	CVi = CVo (Z=0.31)	CVi = CVo Z=(0.10)

Figure 8.22 – Tableau de synthèse des différences significatives mises à jour avec le test statistique de Wilcoxon entre la carte virtuelle de SeaTouch, la carte en relief et la description vocale en fonction des sujets lors de réponses aux questions alignées (à gauche) et non alignées (à droite).

De la même manière que la précédente, cette analyse des conditions d'exploration par sujet n'utilise que les variables des niveaux des directions et des localisations car celles du niveau des configurations ne sont pas assez nombreuses (une par sujet) (*cf.* figure 8.22).

8.5.1 En situation alignée

8.5.1.1 Niveau des directions

Le sujet 2 présente le couple de résultats CeR est supérieure à CVi (Z=2.37) et CVi est inférieure à CVo (Z=2.06) (*cf.* figure 8.23).

Aucune autre différence significative à n'apparaît à ce niveau.

8.5.1.2 Niveau des localisations

Le sujet 2 présente le résultat CeR est supérieure à CVi (Z=1.99) pour les Ate (*cf.* figure 8.23).

Le sujet 3 présente le résultat CVi est inférieure à CVo pour les Dte (Z=2.20) et les Ate (Z=2.20).

Le sujet 4 présente le résultat CeR est inférieure à CVi (Z=1.99) pour les Dte.

Aucune autre différence significative n'apparaît à ce niveau.

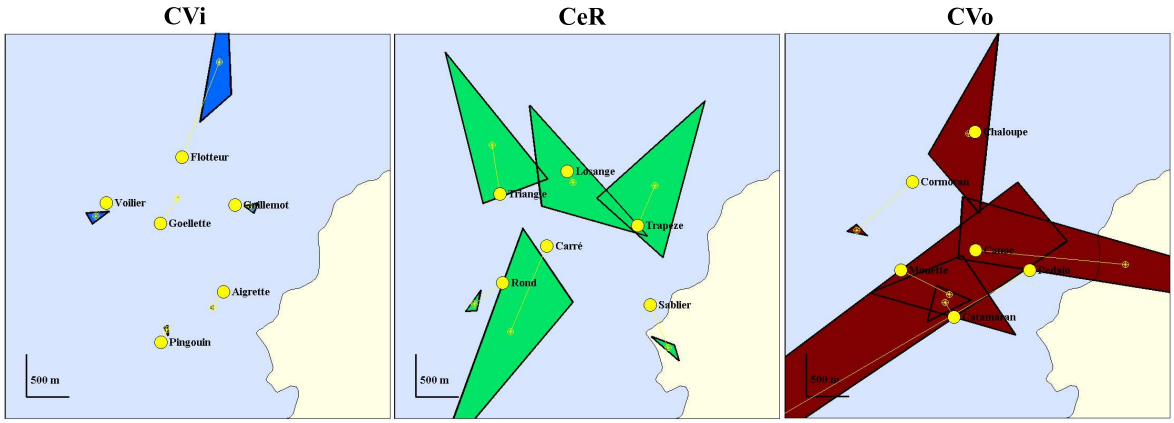


Figure 8.23 – Constructions issues de la convergence projective en réponses aux questions **alignées** après les explorations de la carte virtuelle de SeaTouch (CVi), de la carte en relief (CeR) et de la description vocale (CVo) du sujet 2. Les disques jaunes cerclés de noir sont les positions exactes des balises, les petites étoiles jaunes représentent les localisations cognitives. Les segments jaunes correspondent erreurs de distances (Dte). Les aires des triangles correspondent aux aires des triangles d'erreur (Ate).

En résumé, en situation alignée le sujet 2 obtient trois résultats en faveur des cartes virtuelles de SeaTouch et le sujet 3 en présente deux. A l'inverse, le sujet 4 présente un résultat isolé en faveur des cartes vocales.

8.5.2 En situation non alignée

8.5.2.1 Niveau des directions

Le sujet 2 présente le résultat CVi est inférieure à CVo (Z=2.24) (*cf.* figure 8.24).

Le sujet 3 présente également le résultat CVi est inférieure à CVo (Z=2.34).

Aucune autre différence significative n'apparaît à ce niveau.

8.5.2.2 Niveau des localisations

Le sujet 2 présente le couple de résultats CeR est inférieure à CVo pour les Dte (Z=2.20) et les Ate (Z=1.99), et le résultat CVi est inférieure à CVo (Z=1.99) pour les Dte (*cf.* figure 8.24).

Le sujet 5 présente le résultat CeR est inférieure à CVi (Z=1.99) pour les Dte.

Aucune autre différence significative n'apparaît à ce niveau.

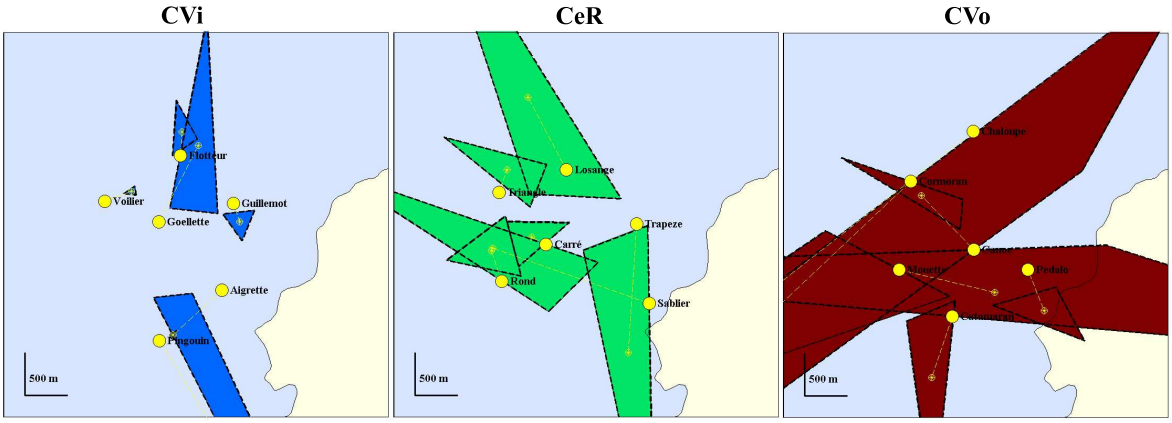


Figure 8.24 – Constructions issues de la convergence projective en réponses aux questions **non alignées** après les explorations de la carte virtuelle de SeaTouch (CVi), de la carte en relief (CeR) et de la description vocale (CVo) du sujet 2. Les disques jaunes cerclés de noir sont les positions justes des balises, les petites étoiles jaunes représentent les localisations cognitives. Les segments jaunes correspondent erreurs de distances (Dte). Les aires des triangles correspondent aux aires des traingles d'erreur (Ate).

En résumé, en situation non alignée le sujet 2 présente deux résultats témoignant de meilleures performances lors de l'exploration de la carte en relief par rapport à l'exploration de la description vocale et deux autres résultats montrant de meilleures performances lors de l'exploration de la carte virtuelle de SeaTouch par rapport à l'exploration de la description vocale. Ce constat suggère que la carte en relief est plus efficace que la carte virtuelle, elle-même plus efficace que la description

vocale pour le sujet 2 en situation non alignée. Par ailleurs, le sujet 3 présente un résultat isolé en faveur de la carte virtuelle de SeaTouch alors que le sujet 5 en présente un en faveur des cartes en relief.

8.6 Les performances des sujets en CVi

Nous consacrons le chapitre suivant (*cf.* chapitre 9.4) à l'analyse des *patterns* d'exploration enregistrés lors de l'exploration des cartes virtuelles de SeaTouch pour chaque sujet. Afin de pouvoir apprécier les intérêts des différentes stratégies d'exploration, nous avons besoin de disposer d'indications sur les performances propres à chaque sujet.

8.6.1 Indications sur les performances individuelles en situation alignée

Question alignées en CVi					
Niveaux	Directions	Localisations		Configurations	
Variables	Ea en (°)	Dte (en km)	Ate (en km²)	r	DI
Sujet 1	**9 ± (6)**	**0,39 ± (0,18)**	**0,13 ± (0,03)**	**0.90**	**43.50**
Sujet 2	**10 ± (11)**	**0,39 ± (0,40)**	**0,05 ± (0,11)**	**0.93**	**36.11**
Sujet 3	**9 ± (8)**	**0,30 ± (0,13)**	**0,06 ± (0,07)**	**0.94**	**33.53**
Sujet 4	**22 ± (17)**	**1,99 ± (1,90)**	**2,82 ± (2,71)**	**0.17**	**98.49**
Sujet 5	**21 ± (20)**	**5,05 ± (10,55)**	**10,66 ± (25,22)**	**0.36**	**93.24**
Sujet 6	**16 ± (13)**	**0,64 ± (0,51)**	**0,24 ± (0,23)**	**0.84**	**53.61**

Figure 8.25 – Performances individuelles en situation alignée. Les variables Ea, Dte et Ate sont des moyennes alors que r et DI sont des valeurs uniques.

Lors d'une étude chez les aveugles utilisant une carte en relief, Rossano et Warren (1989b) trouvent une Ea moyenne de quinze degrés en situation alignée (*cf.* § 3.4.2.6 p.108). Les moyennes des Ea du tableau 8.25 montrent que les sujets 1, 2 et 3 présentent des erreurs inférieures à cette valeur alors que les sujets 4, 5 et 6 obtiennent des erreurs supérieures. Cette appréciation peut être affinée au niveau des localisations. Ici, les Dte et les Ate moyennes des sujets 1, 2, 3 et 6 peuvent être regroupées en dessous du kilomètre et du kilomètre carré alors que celles des sujets 4 et 5 sont très largement supérieures. Le niveau des configurations semblent confirmer ces tendances.

En résumé, à la suite de l'exploration des cartes virtuelles de SeaTouch, les sujets 1, 2, 3 et 6 paraissent plus précis et cohérents que les sujets 4 et 5 en situation alignée (*cf.* figure 8.26).

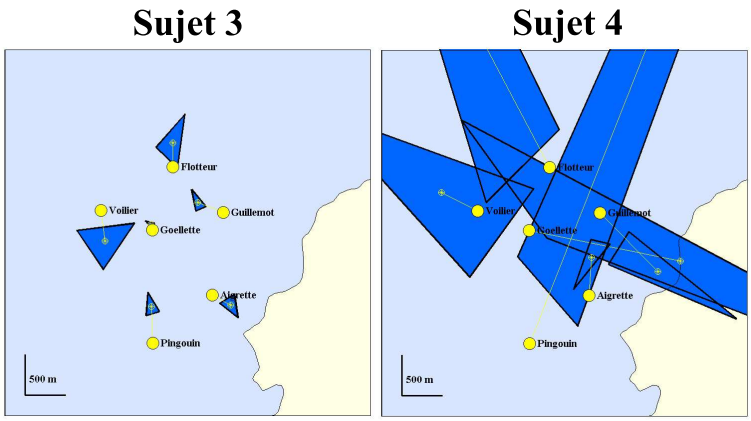


Figure 8.26 – Constructions issues de la convergence projective en réponses aux questions **alignées** après les explorations de la carte virtuelle de SeaTouch (CVi) des sujets 3 et 4.

8.6.2 Indications sur les performances individuelles en situation non alignée

Question Non alignées en CVi					
Niveaux	Directions	Localisations		Configurations	
Variables	Ea en (°)	Dte (en km)	Ate (en km²)	r	DI
Sujet 1	**26 ± (9)**	**1,37 ± (1,39)**	**0,93 ± (1,29)**	**0.36**	**93.17**
Sujet 2	**14 ± (11)**	**1,05 ± (1,32)**	**0,56 ± (1,01)**	**0.77**	**63.52**
Sujet 3	**12 ± (9)**	**0,58 ± (0,47)**	**0,33 ± (0,51)**	**0.79**	**61.01**
Sujet 4	**42 ± (30)**	**0,93 ± (0,17)**	**2,31 ± (2,45)**	**0.83**	**56.09**
Sujet 5	**46 ± (23)**	**3,04 ± (2,74)**	**1,44 ± (1,16)**	**0.44**	**89.99**
Sujet 6	**30 ± (30)**	**2,54 ± (1,35)**	**5,25 ± (4,85)**	**0.51**	**86.15**

Figure 8.27 – Performances individuelles en situation non alignée. Les variables Ea, Dte et Ate sont des moyennes alors que r et DI sont des valeurs uniques.

En situation non alignée, les sujets 2 et 3 se distinguent à nouveau en conservant des Ea moyennes inférieures à quinze degrés. A l'inverse, les sujets 4 et 5 se démarquent en réalisant des Ea moyennes supérieures à quarante degrés. Ce constat est relativement confirmé par les variables du niveau des localisations. Tout d'abord le sujet 3 présente des Dte et Ate moyennes deux fois plus faibles que celles du sujet 2. Ensuite, le sujet 4 présente une Dte moyenne plus faible que le sujet 5 mais une Ate moyenne plus forte par ailleurs. Ainsi il semblerait que le sujet 4 soit plus précis mais moins cohérent que le sujet 5. Finalement, d'après le niveau des configurations, le sujet 4 présente un coefficient de corrélation supérieur au sujet 3 alors que le sujet 1 présente le coefficient de corrélation plus petit.

En résumé, en situation non alignée les résultats des différents niveaux s'accordent sur les bonnes performances des sujets 2 et 3. Par contre les différentes variables sont particulièrement contrastées pour le sujet 4 (*cf.* figure 8.28). Alors que les performances réalisées au niveau des directions sont très faibles (erreurs angulaires importantes), celles du niveau des localisations sont fortes (petites distances et aires cognitives). Le sujet 4 se révèlent donc plus précis que cohérent.

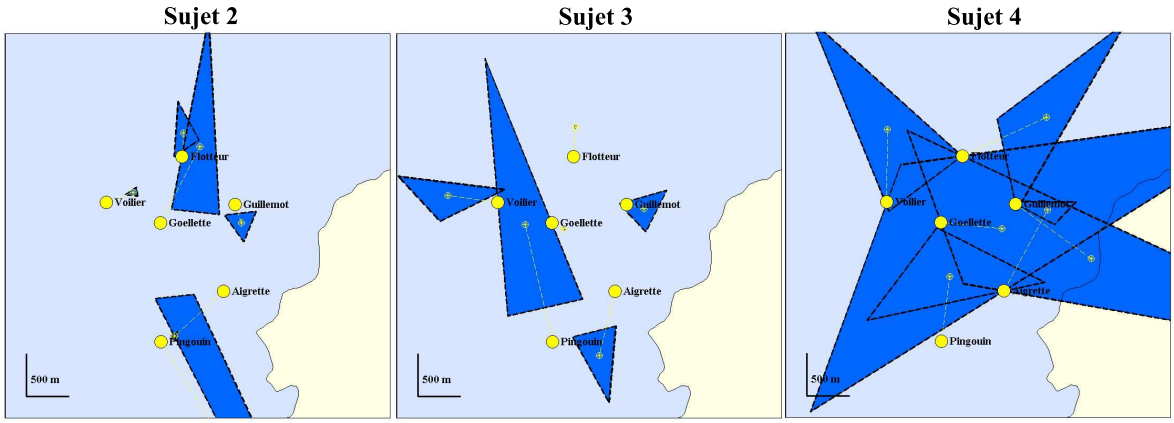


Figure 8.28 – Constructions issues de la convergence projective en réponses aux questions **non alignées** après les explorations de la carte virtuelle de SeaTouch (CVi) des sujets 2, 3 et 4. Ici, alors que les sujets 2 et 3 se révèlent précis et cohérents, le sujet 4 semble précis mais peu cohérent si l'on considère les aires des triangles d'erreur.

8.7 Conclusion sur résultats de l'expérience de cartographie

L'ensemble des résultats issus de l'analyse des réponses aux questions de cette expérience de cartographie montre une absence de différence significative entre les précisions et les cohérences des conditions d'exploration de la carte virtuelle de SeaTouch (CVi) et de la carte en relief classique (CéR). Parallèlement, les résultats issus de la condition d'exploration de la description vocale sont significativement inférieurs à ceux issus de ces deux conditions.

Finalement, notre première hypothèse selon laquelle **la carte de SeaTouch permet aux marins non-voyants de construire une représentation spatiale d'une précision au moins équivalente à celle construite à partir d'une carte en relief ou d'une description vocale** se vérifie. L'analyse plus précise des *patterns* d'exploration est susceptible d'apporter des éléments de discussion sur ces résultats.

Chapitre 9

Explorations cartographiques

A la suite de l'analyse quantitative des représentations spatiales construites par les sujets aux niveaux des directions, des localisations et des configurations, l'enregistrement des mouvements d'exploration nous permet de proposer une analyse qualitative des *patterns* mis en œuvre par chacun de nos sujets pendant la tâche d'apprentissage de la carte virtuelle de SeaTouch. Nous faisons ici référence aux *patterns* identifiés dans la littérature. Rappelons que les stratégies du périmètre (P), de la grille (G), cyclique (C) ont tendance à s'inscrire dans un référentiel spatial de type égocentré alors que les stratégies du périmètre-à-objets (PO), des allers et retours (AR), des objets-à-objets (OO) et du points de référence (PR) ont été identifiées comme s'inscrivant dans un référentiel de type allocentré (*cf.* tableau 3.2 p.97).

Tout d'abord, nous observons les *patterns* recueillis pendant la phase de **recherche** des différentes balises pour chaque sujet. La phase de recherche est la période d'activité exploratoire pendant laquelle les sujets cherchent à identifier les balises. Elle prend fin dès que toutes les balises ont été trouvées. Bien que ce découpage nous paraisse important pour associer les *patterns* d'exploration aux intentions des sujets, ces derniers n'effectuent pas de pause au cours de la tâche d'apprentissage.

Ensuite, nous examinons les *patterns* mis en œuvre pendant la période d'activité exploratoire où les sujets sont motivés par l'apprentissage des positions relatives des six balises de la configuration. Nous appelons cette séquence la phase de **mémorisation**.

Finalement, nous cherchons à éclairer notre seconde hypothèse selon laquelle **au cours de l'exploration d'une carte virtuelle de SeaTouch, l'utilisation de stratégies d'exploration haptique de type allocentré améliore la précision de la représentation spatiale construite par des sujets aveugles (hypothèse 2)**. D'un point de vue opérationnel, si les sujets qui présentent des *patterns* d'exploration de type allocentré obtiennent de meilleures performances en réponses aux questions alignées et non alignées alors cette hypothèse se vérifie.

9.1 La phase de recherche

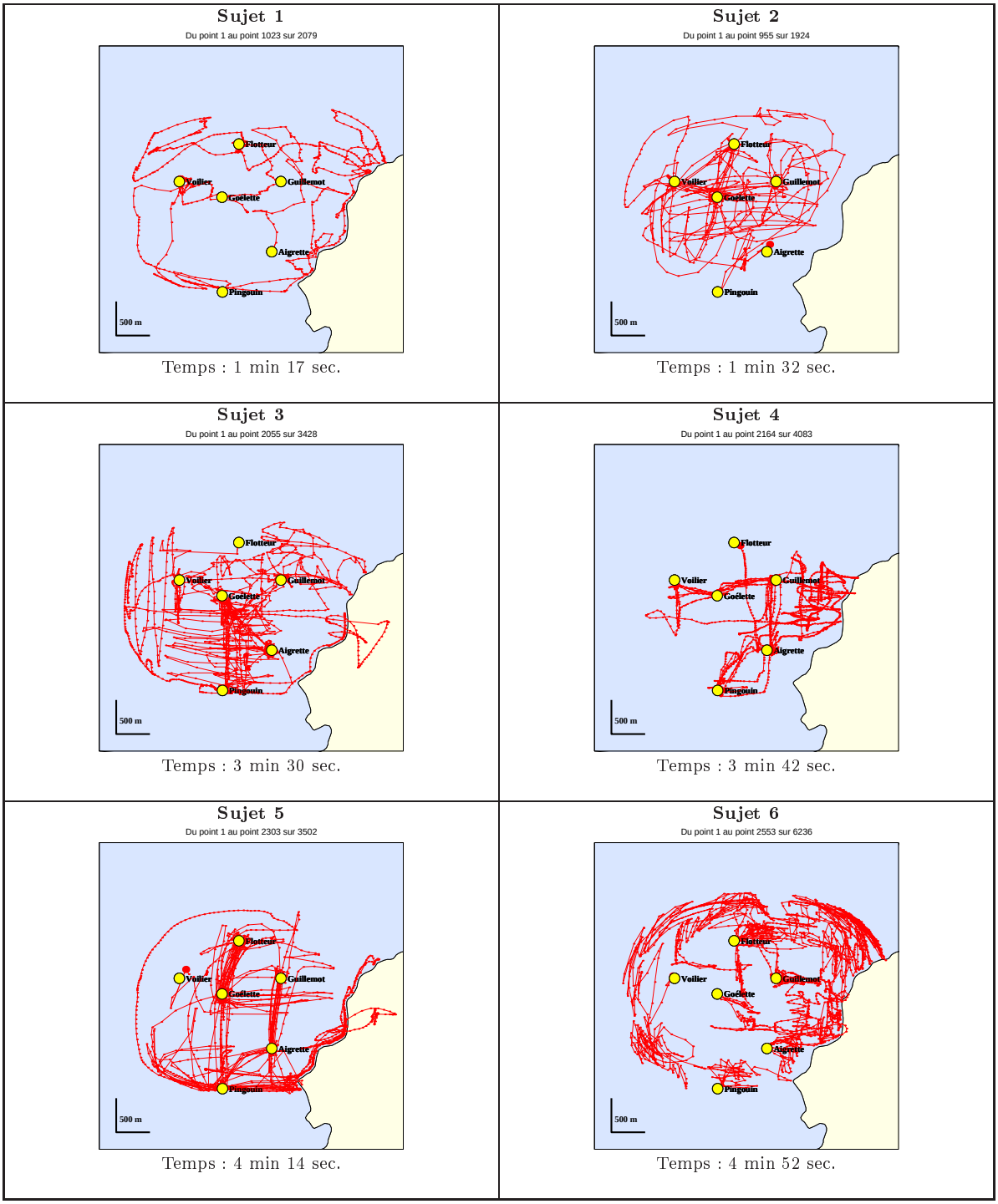


Tableau 9.1 – *Patterns* d'exploration de la phase de recherche.

Le sujet 1 semble utiliser les stratégies du périmètre (égo) et de la grille (égo). Cependant, les *patterns* d'exploration de ces stratégies ne sont pas particulièrement flagrants et se révèlent très courts (*cf.* tableau 9.1).

Le sujet 2 présente les *patterns* des stratégies de la grille (égo) et des allers et retours (allo) dans un laps de temps particulièrement court également (*cf.* tableau 9.1).

Le sujet 3 associe les *patterns* des stratégies du périmètre (égo) et de la grille (égo) dans un premier temps. Par contre dès qu'une balise est identifiée, les *patterns* des stratégies du périmètre-à-objet et des allers et retours (allo) apparaissent (*cf.* tableau 9.1).

Le sujet 4 semble utiliser les stratégies du périmètre-à-objet et de la grille (égo) en appliquant leurs *patterns* respectifs sur une petite zone de l'espace de travail. Il présente ensuite quelques *patterns* cycliques (égo) et d'allers et retours (allo) (*cf.* tableau 9.1).

Le sujet 5 utilise clairement la stratégie du périmètre (égo) avant d'explorer le centre de la configuration. Ici quelques *patterns* de grille (égo) sont rapidement suivis de nombreux allers et retours (allo) entre les balises. Le *pattern* de la stratégie du périmètre-à-objet est également très sollicité. Les mouvements s'inscrivant dans les axes verticaux et horizontaux sont tout particulièrement représentés. Par ailleurs, le temps d'exploration se révèle assez long (*cf.* tableau 9.1).

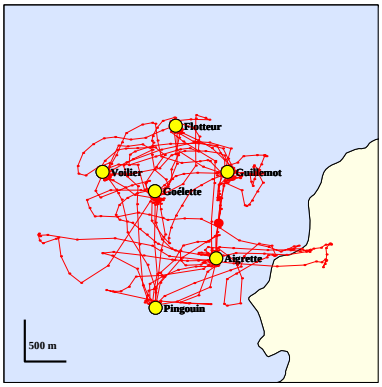
Le sujet 6 semble associer les *patterns* des stratégies du périmètre (égo) et de la grille (égo) au sein de petites zones disséminées sur les bords de l'espace de travail. Par ailleurs, le *pattern* de la stratégie du périmètre-à-objets (allo) apparaît pour chaque balise. Ce type d'exploration demande un temps important pour découvrir les six balises (*cf.* tableau 9.1).

En résumé, les *patterns* d'exploration mis en œuvre par chaque sujet présentent des points communs et des différences. Nous observons ainsi que tous les sujets utilisent au moins une fois le *pattern* de la stratégie de la grille (égo) pour trouver les balises dans l'intérieur de l'espace. Le *pattern* de la stratégie du périmètre (égo) est également largement sollicité par l'ensemble des sujets à l'exception du sujet 4. A l'exception du sujet 1, l'utilisation des *patterns* des stratégies des allers et retours (allo) et du périmètre-à-objets semble témoigner des volontés des sujets à mémoriser les positions des balises avant de les avoir toutes découvertes.

9.2 La phase de mémorisation

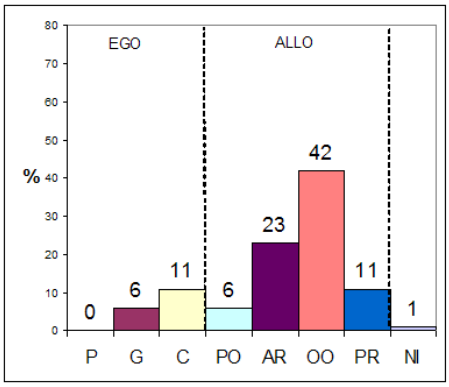
Sujet 1

Du point 1023 au point 2079 sur 2079



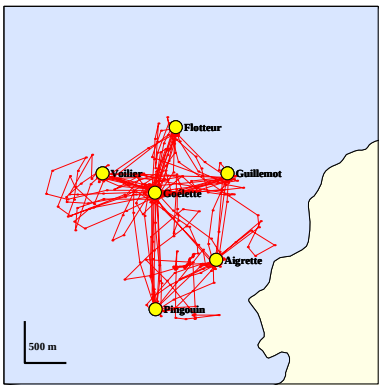
Temps : 2 min 57 sec.

***Patterns* identifiés**



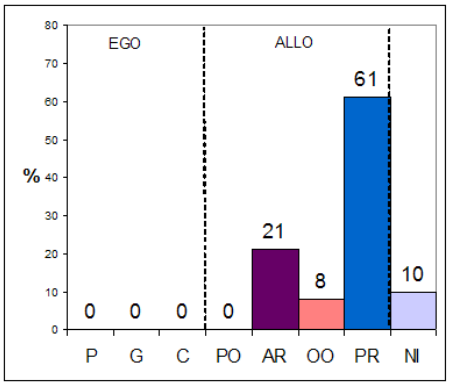
Sujet 2

Du point 956 au point 1924 sur 1924



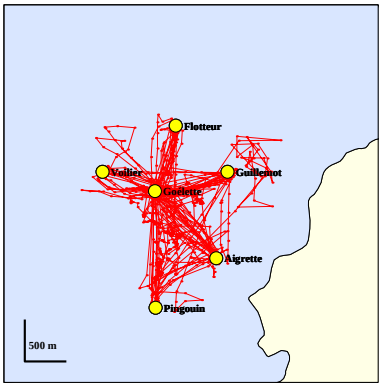
Temps : 3 min 20 sec.

***Patterns* identifiés**



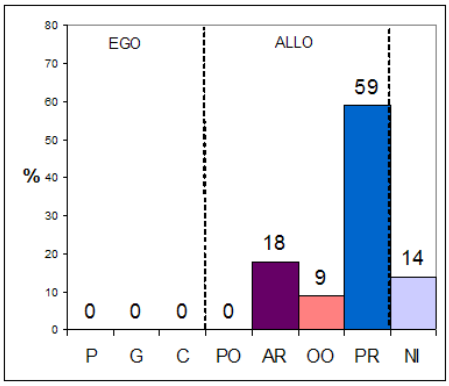
Sujet 3

Du point 2056 au point 3428 sur 3428



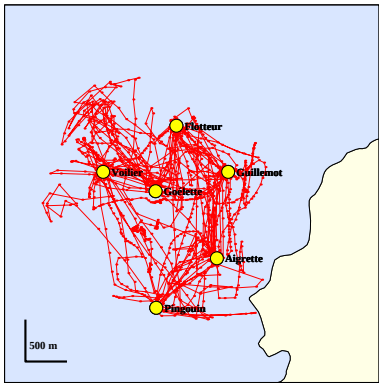
Temps : 5 min 18 sec.

***Patterns* identifiés**



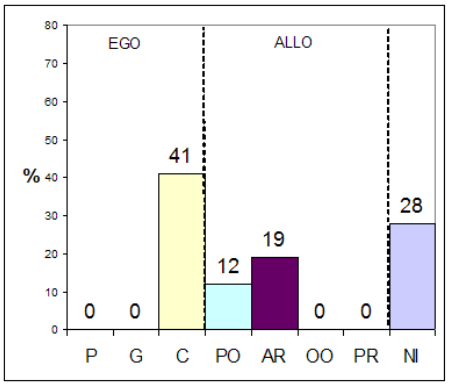
Sujet 4

Du point 2165 au point 4083 sur 4083



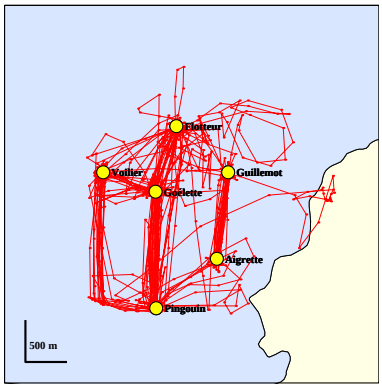
Temps : 9 min 16 sec.

***Patterns* identifiés**



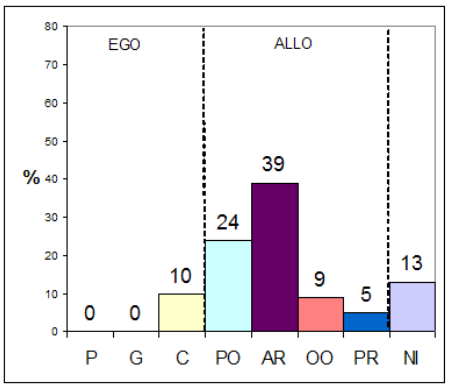
Sujet 5

Du point 2304 au point 3502 sur 3502



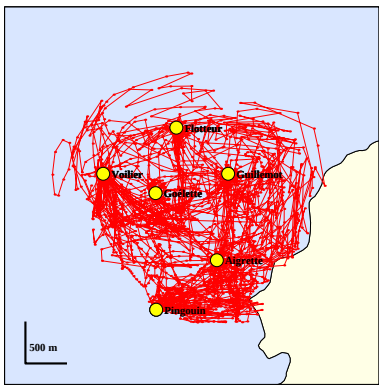
Temps : 5 min 34 sec.

***Patterns* identifiés**



Sujet 6

Du point 2554 au point 6236 sur 6236



Temps : 16 min 14 sec.

***Patterns* identifiés**

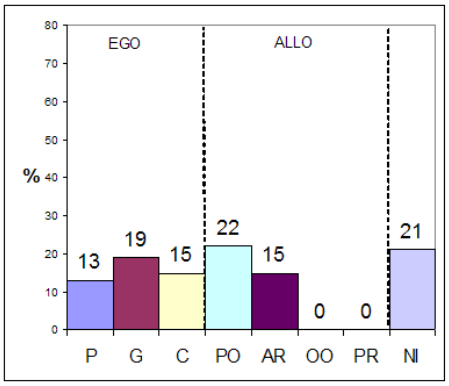


Tableau 9.2 – Mouvements enregistrés et graphiques des pourcentages de temps des *patterns* identifiés lors de la phase de mémorisation. Les *patterns* des stratégies du périmètre (P), de la Grille (G), cyclique (C), périmètre-à-objets (PO), des allers et retours (AR), objets-à-objets (OO) et du points de référence (PR) ont été repérés. Les mouvements non identifiés (NI) comme appartenant à des *patterns* connus apparaissent également.

Le tableau 9.2 révèle les mouvements d'exploration enregistrés au cours de la phase de mémorisation, c'est-à-dire la période d'activité exploratoire pendant laquelle les sujets cherchent à mémoriser la configuration des six balises. Ici, nous avons identifié les *patterns* appartenant aux stratégies connues s'inscrivant dans les deux types de référentiel spatiaux (*cf.* tableau 3.2 p.97).

Les *patterns* d'exploration présentés par le sujet 1 s'inscrivent le plus souvent dans les stratégies objets-à-objets (allo) (42%) et des allers et retours (allo) (23%). Il utilise également le point de référence (allo) de la « Goélette » (11%). Finalement, le sujet paraît réaliser quelques mouvements cycliques (égo) (11%) et de la grille (égo) (6%).

Le sujet 2 utilise majoritairement le point de référence (allo) de la « Goélette » (61%). Néanmoins les allers et retours (allo) entre la « Goélette » et l'« Aigrette » sont moins nombreux qu'avec les autres balises.

Le sujet 3 présente le même profil que le sujet 2 à l'exception du grand nombre d'allers et retours (allo) « Goélette - Aigrette » qu'il réalise. Le *pattern* d'exploration de la stratégie du point de référence (allo) (59%) du sujet 3 se révèle plus complet que celui du sujet 2. Par ailleurs, parmi les *patterns* non identifiés, une stratégie de « recherche d'axes intrinsèques à la configuration » (14%) apparaît (*cf.* figure 9.1). Cette stratégie semble s'inscrire dans un référentiel du type allocentré puisque l'axe recherché est indépendant des position et orientation du sujet. Finalement, le sujet 3 réalise des pauses (5%) pendant lesquelles il vérifie qu'il se souvient de ce qu'il a appris.

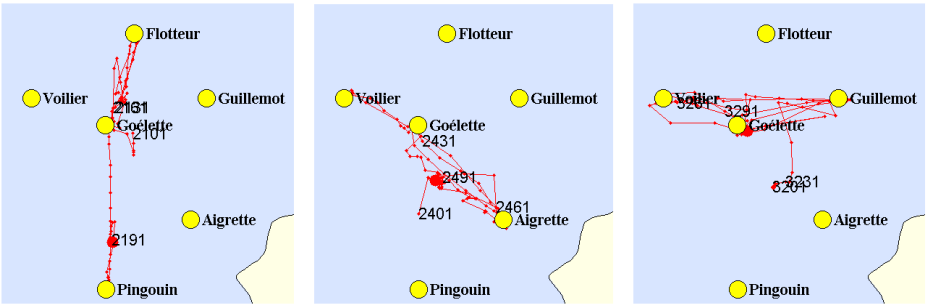


Figure 9.1 – *Patterns* de « recherche d'axes intrinsèques à la configuration (allo) » du sujet 3. Les chiffres sur la trace des mouvements traduisent la chronologie de l'exploration.

Le sujet 4 présente un profil assez différent des trois premiers. En effet, ce dernier réalise le plus souvent des mouvements cycliques (égo) (41%) sur une partie ou l'ensemble des balises de la configuration. Cependant, les *patterns* des stratégies périmètre-à-objet (12%) et des allers et retour (19%) sont également mis en œuvre. Par ailleurs, près d'un tiers des mouvements (28%) n'ont pas pu être identifiés au regard des stratégies issues de la littérature. Ici la stratégie de « recherche d'axes intrinsèques à la configuration (allo) » apparaît (5%).

Le sujet 5 présente principalement les *patterns* des stratégies des allers et retours (allo) (39%) et

périmètre-à-objet (24%). En outre, il réalise quasiment la totalité de ses mouvements selon les axes verticaux et horizontaux. Il déclare d'ailleurs s'être imaginé un quadrillage. Il est aisé d'accorder du crédit à cette affirmation si l'on remarque le *pattern* d'exploration situé dans l'angle en bas à gauche de l'espace de travail (*cf.* tableau 9.2. Sujet 5) . En effet, pendant la phase de mémorisation, le sujet 5 a positionné sa main gauche dans l'espace de travail du Phantom à la verticale du « voilier ». Il semble l'avoir utilisée pour compléter physiquement le quadrillage virtuel imaginé.

Le sujet 6 utilise majoritairement le *pattern* de la stratégie périmètre-à-objet (24%). Quand il n'utilise pas cette stratégie, il semble combiner les stratégies de la grille (égo) (13%) et du périmètre (égo) (15%), parfois à la manière d'une canne blanche virtuelle (*cf.* figure 9.2).

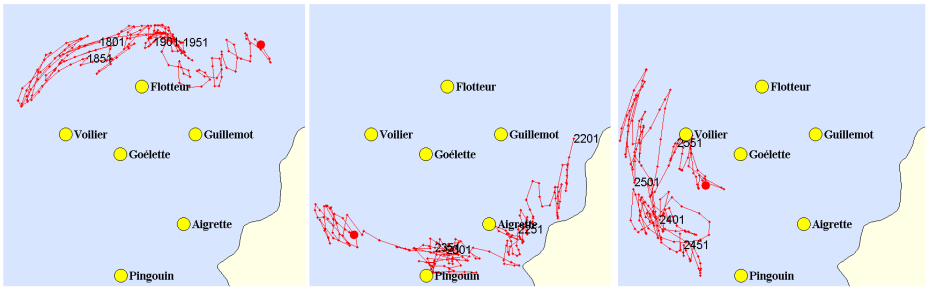
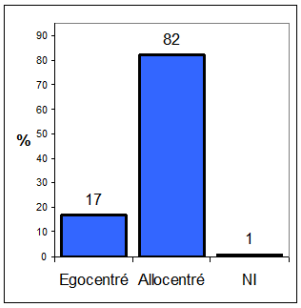
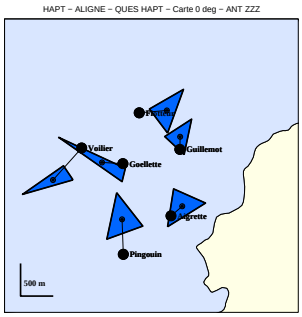
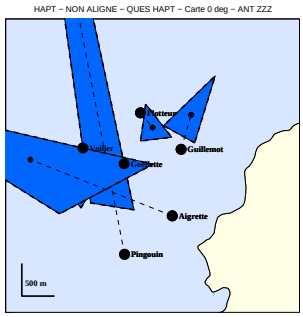
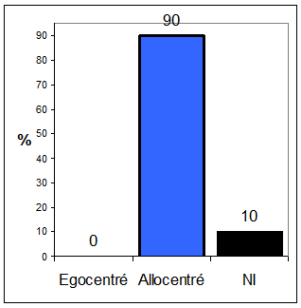
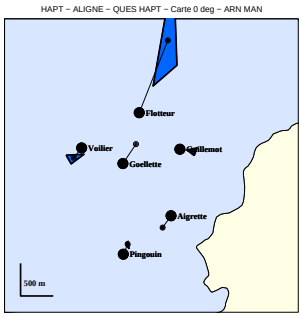
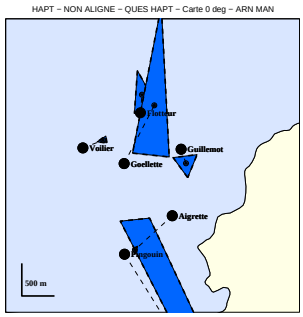
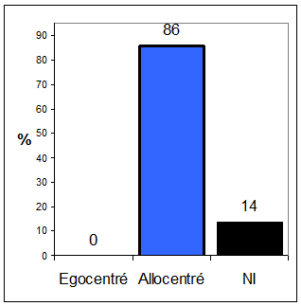
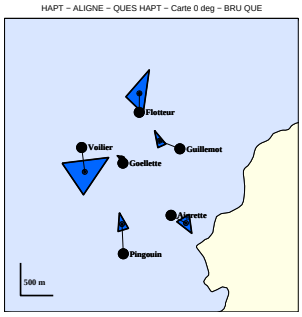
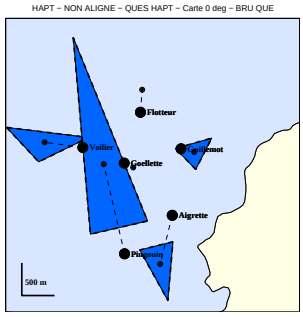


FIGURE 9.2 – *Patterns* combinés des stratégies du périmètre (égo) et de la grille (égo) mis en œuvre par le sujet 6. Les chiffres sur la trace d'exploration correspondent à l'ordre des points.

En bref, au cours de la phase de mémorisation, il semble que les *patterns* d'exploration mis en œuvre par les sujets 1, 2, 3 et 5 s'inscrivent plus souvent dans un référentiel de type allocentré. Plus précisément, le sujet 1 utilise surtout la stratégie objets-à-objets (allo), les sujets 2 et 3 plus souvent celle du point de référence (allo), et le sujet 5 celle des allers et retours (allo). A l'inverse, les sujets 4 et 6 présentent des *patterns* plus diversifiés en sollicitant plus largement les stratégies de type égocentré. Le sujet 4 utilise plus de *patterns* cycliques (égo) alors que le sujet 6 combine ceux de la grille (égo) et du périmètre (égo). Ces deux sujets semblent également solliciter les stratégies périmètre-à-objets (allo) et des allers et retours (allo) s'inscrivant dans un référentiel de type allocentré. En ce qui concerne les temps d'exploration les sujets 4 et 6 utilisant des stratégies des deux référentiels sont deux à cinq fois moins rapides que les autres avec plus de seize minutes pour le sujet 6 contre moins de trois minutes pour le sujet 1.

9.3 Les performances et les types de référentiels des *patterns*

Référentiels spatiaux des *patterns* observés	Réponses aux questions alignées	Réponses aux questions non alignées
Sujet 1		
		
Sujet 2		
		
Sujet 3		
		

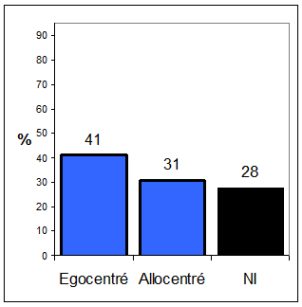
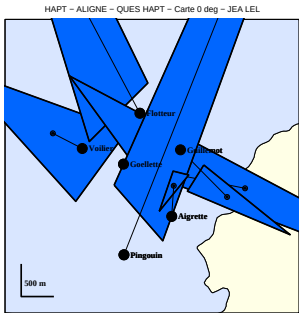
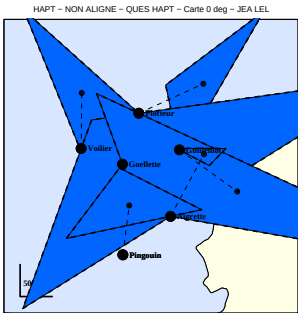
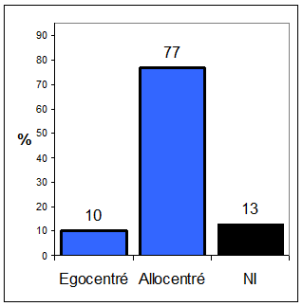
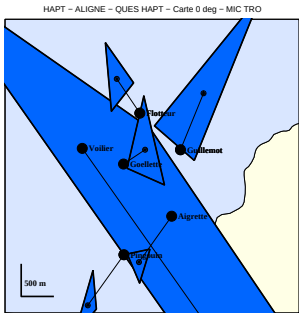
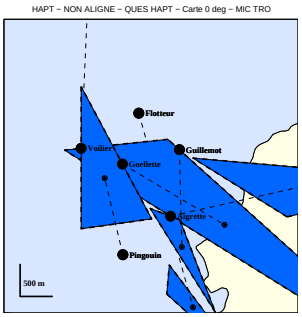
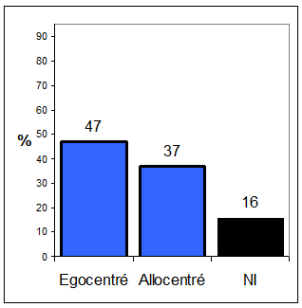
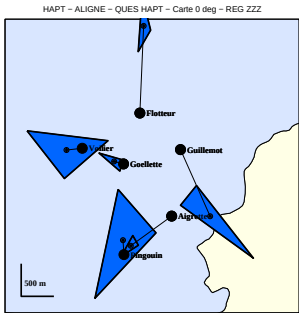
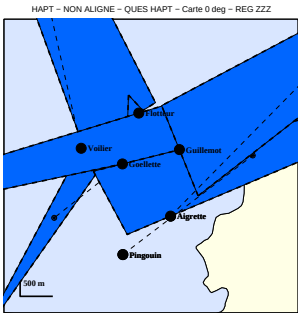
Référentiels spatiaux des *patterns* observés	Réponses aux questions alignés	Réponses aux questions non alignés
Sujet 4		
		
Sujet 5		
		
Sujet 6		
		

Tableau 9.3 – Proportions des types des référentiels spatiaux des *patterns* identifiés en fonction des constructions issues de la convergence projective en réponse aux questions alignées et non alignées.

En réponse aux questions alignées, les figures issues de la convergence projective (*cf.* tableau 9.3) et l'analyse des valeurs du paragraphe 8.6.1 (p.206) semblent montrer que les sujets 1, 2, 3 et 6 présentent les représentations les plus précises et cohérentes. Si les trois premiers sujets investissent en

grande majorité les stratégies de type allocentré (82%, 90%, 86%), le sujet 6 les utilise deux fois moins fréquemment (37%) alors qu'il sollicite également largement les stratégies de type égocentré (47%). Au regard de ces résultats, nous pourrions interpréter les profils « tout allo » ou « mixte égo-allo » comme efficaces. Cependant le sujet 5 présente le profil presque « tout allo » (77%) et réalise pourtant de moins bonnes performances que les autres. Ainsi, au sein des stratégies de type allocentré, celle des allers et retours (allo), utilisée à 39% par le sujet 5 semble moins efficace que celle objets-à-objets (allo) utilisée à 42% par le sujet 1, et celle du point de référence (allo) de la « Goélette » respectivement sollicitée à 61% et 59% par les sujets 2 et 3. Par ailleurs, en référence aux résultats des sujets 4 et 6 il se révèle que le profil « mixte égo-allo » n'est pas systématiquement efficace pour les performances en situation alignée. En effet, comme le sujet 6, le sujet 4 utilise presque autant de stratégies de type égocentré (41%) qu'allocentré (31%) alors qu'il réalise de moins bonnes performances. Ainsi, il semble que la combinaison des stratégies de type égocentré du périmètre (égo) (13%) et de la grille (égo) (19%), sorte de canne blanche virtuelle (*cf.* figure 9.2 p.215), quand elle est alternée avec la stratégie de type allocentré périmètre-à-objets (allo) (22%) par le sujet 6, soit plus efficace que l'association des stratégies de type égocentré cyclique (41%) et de type allocentré des allers-et-retours (19%) par le sujet 4.

En réponse aux questions non alignées, les figures issues de la convergence projective (*cf.* tableau 9.3) et l'analyse des valeurs du paragraphe 8.6.2 (p.207) semblent montrer que les sujets 2 et 3 présentent les représentations les plus précises et cohérentes. Il se trouve que ces deux sujets sollicitent principalement la stratégie du point de référence (allo). Plus précisément, ils utilisent la balise centrale de la configuration (la « Goélette ») comme point de référence (61% et 59%). Ainsi nous pourrions parler de la « stratégie du point central de référence » (allo). Par ailleurs, il semble que les sujets 4, 5 et 6, dont les résultats en situation non alignées paraissent nettement inférieurs à ceux des sujets 1, 2 et 3 utilisent assez souvent les stratégies du périmètre (égo) et périmètre-à-objets (allo) impliquant le bord de l'espace de travail (*cf.* taleau 9.2 p. 213).

9.4 Conclusion sur les patterns d'exploration

En bref, les sujets qui construisent les représentations spatiales les plus précises et cohérentes basent leurs explorations sur la stratégie du « point central de référence (allo) » alors que ceux présentant les moins bons résultats se soucient plus du bord de l'espace de travail et utilisent entre autres les stratégies du périmètre (égo) et du périmètre-à-objets (allo). Par ailleurs, de nouvelles stratégies telles que celles de « la canne blanche virtuelle (égo) » et la « recherche d'axes intrinsèques à la configuration (allo) » sont mises à jour.

Chapitre 10

Discussion de l'expérience de cartographie

Au cours de cette expérience cartographique, notre but était de vérifier l'efficacité d'une carte virtuelle de SeaTouch par rapport à une carte en relief ou une description vocale. Nous avons donc émis l'hypothèse suivante :

La carte virtuelle de SeaTouch (CVi) permet aux marins non-voyants de construire une représentation spatiale d'une précision au moins équivalente à celles construites à partir d'une carte en relief (CeR) ou d'une description vocale (CVo) (hypothèse 1). Cette hypothèse est analysée avec les résultats des réponses aux questions alignées et non alignées posées à la fin des explorations.

D'une manière générale, l'analyse statistique ne révèle que peu de différences significatives entre les résultats obtenus en CVi, en CeR et en CVo. Néanmoins, chez les sujets 2 et 3 principalement, les erreurs sont moins importantes en CVi. Par ailleurs, quelques résultats isolés révèlent de meilleures performances en CVi et CeR qu'en CVo. L'équivalence entre la précision des connaissances construites par les sujets aveugles à la suite des explorations d'une carte virtuelle de SeaTouch, d'une carte en relief et d'une description vocale se confirme donc.

Notre second objectif était d'identifier les stratégies d'exploration haptique permettant à des sujets aveugles de tirer le meilleur profit de cette carte virtuelle. Nous avons donc émis la seconde hypothèse suivante :

Au cours de l'exploration d'une carte virtuelle de SeaTouch, l'utilisation de stratégies d'exploration haptique de type allocentré améliore la précision de la représentation spatiale construite par des sujets aveugles (hypothèse 2). Cette hypothèse est analysée au moyen des *patterns* d'exploration des sujets au cours de l'apprentissage de la configuration des balises situées sur cette carte.

L'analyse des stratégies d'exploration haptique des sujets témoigne d'une efficacité particulière de

la stratégie du point central de référence (allo). Cette dernière est principalement mise en œuvre par les sujets 2 et 3. Ce résultat nous permet d'affiner la compréhension des mécanismes mis en œuvre au cours de l'exploration d'une carte virtuelle de SeaTouch.

Dans un premier temps, afin d'expliquer ces résultats, nous nous intéressons à trois principales différences qui peuvent exister entre les conditions d'exploration pour la construction d'une représentation spatiale de type carte. Ainsi, nous discutons tout d'abord de l'influence du caractère séquentiel des explorations en CVi et CVo par rapport à la nature plus globale des explorations en CeR. Ici, la séquentialité imposée par l'emploi du Phantom semble présenter d'autres intérêts. Ensuite, nous examinons l'utilisation du bord de la carte, aussi appelé périmètre. Ce dernier est susceptible de jouer un rôle différent lors la prise de repères externes en CVi et en CeR. Finalement, nous portons notre attention sur les sensations de la verticalité. En effet, l'invariant gravitaire semble être un repère efficace lors de l'exploration de la carte virtuelle de SeaTouch.

Dans un deuxième temps, nous examinons les *patterns* d'exploration et les résultats de chacun des sujets afin d'approcher les processus cognitifs sollicités pendant l'apprentissage de la configuration de la carte virtuelle de *SeaTouch*. Nous approfondissons alors les mécanismes qui semblent renforcer l'efficacité de la stratégie du point central de référence (allo) pour la coordination des référentiels de types égo et allocentrés lors de la réalisation d'inférences spatiales. Nous discutons finalement de l'intérêt de la nouvelle stratégie de la recherche d'un axe intrinsèque à la configuration pour la construction d'une représentation spatiale indépendante du point de vue initial d'encodage.

10.1 Les paramètres influents des différentes conditions

10.1.1 La séquentialité

On aurait pu s'attendre à ce que l'exploration bimanuelle des CeR permette aux sujets d'encoder plus facilement les relations d'objets-à-objets (allo). En effet, la configuration en relief offre des possibilités de contacts tactilo-kinesthésiques simultanés des six balises avec les dix doigts. Ainsi, lorsque les sujets posent leurs deux mains à plat sur la carte, ils ont accès à la globalité de la configuration.

EN CVo, bien que la liste de langage soit naturellement séquentielle, les cinq directions et distances annoncées relient la balise centrale de la configuration à chacune des balises périphériques. On remarque que les sujets ont tendance à positionner les balises sur la table avec leurs doigts. De cette manière, ils paraissent tenter de transformer une liste de langage en une configuration reproduite de

manière digitale. Ce comportement pourrait être une des raisons des faibles différences existantes entre les explorations en CVo et les deux autres conditions.

En CVi, l'utilisation du Phantom impose un encodage tactilo-kinesthésique de nature exclusivement séquentielle. Si l'on se réfère aux travaux de Millar (1994) et Gentaz et Gaunet (2006), la construction de représentations spatiales au moyen de la modalité haptique s'appuie surtout sur l'encodage kinesthésique des trajets manuels. Ainsi, les contacts simultanés de nature principalement cutanée pourraient se révéler superflus dans l'intériorisation de la configuration des balises. En CVi, la séquentialité des perceptions haptiques contraint les sujets à encoder avec précision les mouvements réalisés pour retrouver les balises déjà découvertes.

En CeR, cet effort de contrôle perceptivo-moteur paraît moins important puisque le déploiement des mains offre la possibilité de retrouver les balises plus rapidement. D'ailleurs, l'exploration « mono-digitale » se traduit également par un accroissement des temps de consultation de la carte. Ceci traduirait la nécessité de multiplier les mouvements d'encodage afin de mémoriser les relations entre les différentes balises de la configuration. Pour illustrer, alors que la durée moyenne d'exploration en CeR est de six minutes et vingt trois secondes (± 2 min. et 03 sec.), celle en CVi est presque deux fois supérieure avec dix minutes et dix sept secondes (± 6 min. et 12 sec.). En CVo, elle est encore plus longue avec douze minutes et dix neuf secondes (± 6 min. et 13 sec.).

Tout se passe donc comme si la séquentialité des cartes de SeaTouch obligeait les sujets à encoder précisément leurs mouvements avant de construire une représentation plus globale de la configuration.

10.1.2 Le périmètre

Hill et Rieser (1993) présentent la stratégie du périmètre (égo) comme un encodage du tour d'une configuration par rapport au corps, c'est-à-dire en utilisant le référentiel égocentré. A l'inverse, la stratégie périmètre-à-objets (allo) sollicite le référentiel allocentré dans le sens où elle témoigne de l'intention de mémoriser les relations entre les bords et les objets. Ainsi, le périmètre est susceptible de fournir des repères dépendant de la position du corps dans un premier temps, puis relatifs à la configuration dans un second temps.

En CVo, bien évidemment, l'absence de bord de carte ne permet pas aux sujets de l'utiliser comme un repère. L'indisponibilité de ce repère pourrait se révéler être un inconvénient par rapport aux deux autres conditions.

En CeR, les sujets utilisent fréquemment le périmètre. Ce dernier, rectangulaire et précis, semble permettre un encodage des positions des balises de la configuration. En effet, si l'on se réfère à l'effet de l'oblique qui implique de meilleures perceptions des verticales et des horizontales que des obliques (Appelle, 1972), le périmètre d'une carte en relief se révèle facile à mémoriser. Il se pourrait donc que l'utilisation de ce bord de carte puisse favoriser une prise de repères relatifs à la configuration.

En CVi, le sujet 6 utilise largement les stratégies du périmètre (égo) et périmètre-à-objets (allo). Cependant ce dernier présente de meilleurs résultats en CeR qu'en CVi. A l'inverse, les sujets qui présentent les meilleurs résultats en CVi n'utilisent que très peu le périmètre de la carte de *SeaTouch*. Leurs *patterns* d'exploration se révèlent directement concentrés sur les balises elles-mêmes (*cf.* 9.2 p.213). Bien que les limites mécaniques de l'espace de travail du Phantom fassent office de bord de carte, sa forme est approximativement ovale et présente un blocage mécanique dans sa partie haute lorsque les sujets cherchent à en faire le tour (*cf.* figure 10.1). Cette forme ovale peu régulière ne facilite donc pas l'utilisation du périmètre des cartes virtuelles de SeaTouch en tant que repère. Finalement, cela renforce les besoins des sujets de créer leur propre structuration de la configuration au moyen de points de repère et d'axes de référence.

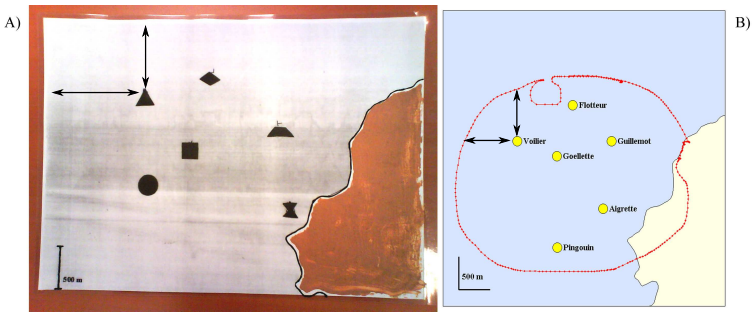


Figure 10.1 – Les périmètres en CeR et CVi. Sur la figure A), le bord de la carte en relief est représenté par le contraste entre la carte de couleur plus claire et la table de couleur plus foncée. Ce bord est facilement perceptible au toucher. Sur la figure B, le périmètre de l'espace de travail du Phantom de la carte virtuelle de SeaTouch est représenté par les points reliés par un trait rouge. Ce périmètre est difficile identifiable par le mouvement. En effet, les sensations de blocage mécanique sont relativement « floues », et sa forme ovale peu régulière ne favorise pas la prise de repères spatiaux. Finalement, sur les deux figures, les doubles flèches correspondent aux mouvements typiques de la stratégie périmètre-à-objets (allo).

10.1.3 La verticalité

Les cartes virtuelles de SeaTouch se tiennent dans le plan vertical. Outre sa composante ergonomique, l'utilisation de ce plan confond l'axe « nord-sud » et celui de la gravité. Au sein de la modalité haptique, Gentaz et Hatwell (1996) montrent qu'il existe un effet de l'oblique dépendant de l'invariant gravitaire. Ainsi, les sujets peuvent utiliser la verticale comme un repère sollicitant à la fois un référentiel de type égocentré, la gravité, et un référentiel de type allocentré, l'axe « nord-sud » de la configuration.

Au regard des *patterns* d'exploration enregistrés au cours de cette expérience, il semble que les sujets 2, 3 et 5 réalisent de nombreux mouvements le long de l'axe vertical « Pingouin »-« Goélette »-

« Flotteur ». Alors que les sujets 2 et 3 sont susceptibles d'utiliser cet axe au sein de la stratégie du point central de référence (allo), le sujet 5 réalise un nombre d'allers et retours (allo) notables entre les différentes balises se trouvant sur un axe vertical. De plus, ce sujet place sa main gauche sur la table à la verticale de la balise « Voilier ». Ainsi, il ajoute artificiellement une balise qu'il juge « pratique » afin d'utiliser un axe vertical de plus (*cf.* tableau 10.1). Pour illustrer l'influence de la verticalité, on peut comparer la moyenne des erreurs angulaires produites à la suite des questions alignées faisant intervenir des balises disposées sur un axe proche de la verticale (13°, ±17) avec les autres (25°, ±39).

Il semble donc que la verticalité du plan des cartes virtuelles de SeaTouch participe tout particulièrement à la structuration de la configuration grâce aux repères confondus de l'axe « nord-sud » et de l'invariant gravitaire.

10.1.4 Synthèse sur les paramètres influents des différentes conditions

En résumé, bien que demandant du temps, la séquentialité due au Phantom et la forme d'ovale irrégulier du périmètre des cartes virtuelles de SeaTouch semblent amener les sujets à structurer leur représentation au moyen d'invariants tels que des points de repère et des axes de références. De plus, la verticalité semble favoriser l'intériorisation d'axes de référence grâce à la correspondance entre l'axe « nord-sud » et l'invariant gravitaire. Cette structuration de la configuration intériorisée par le sujet semble améliorer les raisonnements spatiaux telles que les translations et les rotations mentales. Cependant cette stratégie de recherche de repères avantageux pour la structuration de la représentation nécessite un niveau de développement spatial avancé.

10.2 Les sujets face à la carte virtuelle de SeaTouch

10.2.1 Les résultats individuels

A la suite des explorations haptiques de la configuration (*cf.* tableau 10.1), la précision des réponses aux questions non alignées nous informe sur les capacités des sujets à raisonner sur leur représentation de type carte depuis une orientation différente de celle du point de vue initial d'encodage. Il s'agit donc de combiner des inférences spatiales et des rotations mentales pour réaliser des estimations de directions.

A cet exercice de coordination des référentiels de type égo et allocentré, les sujets 2 et 3 sont les plus performants. Ils présentent les moyennes d'erreurs angulaires (Ea) les plus faibles, respectivement

14° (±11) et 12° (±9) et des moyennes d'aires des triangles d'erreurs (Ate) inférieures au km^2. Vient ensuite le sujet 1, moins précis avec 26° (±9) d'Ea mais relativement cohérent dans ses réponses avec une moyenne des Ate toujours inférieure au km^2. Le sujet 6 présente une précision comparable à celle du sujet 1, soit une moyenne d'Ea de 30° (±30). Cependant la cohérence de ses réponses se révèle largement inférieure puisqu'il présente une moyenne des Ate supérieure à cinq km^2. Finalement les sujets 4 et 5 sont les moins performants avec des moyennes d'Ea respectivement de 42° (±30) et 46° (±23) et des moyennes des Ate de l'ordre de deux kilomètres carrés (*cf.* §8.6.2, p.207). Cette sorte de classement constitue un support pour la compréhension des mécanismes sollicités par les stratégies utilisées par les sujets les plus efficaces.

10.2.2 Les significations des temps et distances d'exploration

Lorsqu'on s'intéresse aux temps consommés et aux distances parcourues avec le Phantom pendant les explorations haptiques des sujets, il s'avère que les plus performants (1, 2 et 3) sont quasiment deux fois plus rapides et/ou parcourent approximativement deux fois moins de distance que les sujets les moins performants (4, 5 et 6). En CVi, les explorations longues et répétées ne sont donc pas la clef de l'encodage d'une représentation efficace. A ce propos, nous suggérons que des explorations plus importantes témoignent de la volonté des sujets de mémoriser toutes les relations de la configuration pour remédier à leurs difficultés de déduction, c'est-à-dire une sorte de « stratégie cognitive de mémorisation locale ». A l'inverse, les explorations plus réduites paraissent traduire une volonté d'intérioriser des invariants comme supports des raisonnements spatiaux. Cette sorte de « stratégie cognitive de structuration mentale » demande donc un niveau de développement spatial plus avancé.

10.2.3 Les interprétations des *patterns* d'exploration en CVi

10.2.3.1 Le sujet 1

L'exploration du sujet 1 témoigne d'une certaine aisance pour l'intériorisation d'une configuration spatiale. En effet, après une rapide exploration, ce dernier déclare être en mesure de répondre aux questions. L'encodage de repères précis semble faire défaut à ce sujet, mais sa rapidité indique pourtant qu'il envisage de déduire assez facilement les relations entre les balises. Bien que ce *pattern* d'encodage reste difficile à interpréter, il montre que le sujet 1 ne focalise pas sur la stricte mémorisation de la configuration.

10.2.3.2 Les sujets 2 et 3

Les cas des sujets 2 et 3 semblent être les plus clairs. En effet, ces derniers favorisent largement l'encodage des relations qui existent entre un point central de référence, la « Goélette », et les autres balises de la configuration. De plus, cette stratégie est compatible avec le repérage d'un axe de référence intrinsèque à la configuration entre le « Pingouin », la « Goélette » et le « Flotteur ». De surcroît, nous avons vu que cet axe correspond approximativement au repère privilégié que constitue l'axe vertical. Finalement, tout se passe comme si ces sujets envisageaient dès l'exploration de déduire les relations internes de la configuration à partir de repères tels qu'un point central de référence, un axe intrinsèque à la configuration et la verticalité. L'activité de ces sujets témoigne de la mise en œuvre d'une stratégie cognitive de structuration mentale.

10.2.3.3 Le sujet 4

A l'inverse, le *pattern* d'exploration du sujet 4 ne semble pas témoigner pas de la recherche de repères particuliers. Il examine la configuration de proche en proche et répéte ce trajet conformément à la stratégie cyclique (égo). Par ailleurs, si le sujet 4 réalise une exploration relativement longue dans le temps, la distance qu'il parcourt se révèle malgré tout assez courte. Ainsi, il semble que celui-ci se focalise sur la mémorisation d'un trajet en particulier sans anticiper de futures déductions de position des balises les unes par rapport aux autres. Il applique donc une stratégie cognitive de mémorisation locale.

10.2.3.4 Le sujet 5

Comme évoqué au paragraphe 10.1.3 ci-dessus, le sujet 5 utilise principalement l'axe vertical. Bien que l'utilisation de cet axe fournisse un invariant *a priori* efficace, l'importante quantité de mouvements d'allers et retours sur cet axe témoigne d'une intention de mémorisation. Alors que les sujets 1 et 2 semblent aller au contact des balises pour vérifier si leurs déductions sont correctes, le sujet 5 paraît insister sur la mémorisation précise des relations entre les balises se trouvant sur des axes verticaux. Dans ce souci, le « couple vertical » formé par l'« Aigrette » et le « Guillemot » (à droite de la configuration) se trouve isolé du reste de la configuration. Ce type d'exploration ne traduit pas l'anticipation d'un raisonnement déductif sur les relations entre les balises à partir d'une représentation spatiale de type carte. L'activité du sujet 5 semble s'inscrire dans une stratégie cognitive de mémorisation locale. Notons que ce sujet est aveugle de naissance. Les résultat des travaux de Millar (1994) parmi d'autres montrent l'habitude à mémoriser plus qu'à inférer des relations spatiales. Ainsi, dans le cas du sujet 5, la précocité de la cécité pourrait influencer les stratégies d'exploration et les processus cognitifs mis en œuvre.

10.2.3.5 Le sujet 6

Le *pattern* d'exploration haptique du sujet 6 est le plus long en temps et en distance. Cela semble également témoigner de la mise en œuvre d'une stratégie de mémorisation locale. Notons que comme le sujet 5, le sujet 6 est aveugle de naissance. Ainsi, peut-être cherche-t-il également à mémoriser toute la configuration en privilégiant la répétition des mouvements. Cependant, à l'inverse du sujet 5, la verticalité et les allers et retours (allo) ne semblent pas particulièrement privilégiés. Le sujet 6 paraît chercher des repères par rapport à son propre corps avec la stratégie de la grille (égo). Par ailleurs, comme évoqué au paragraphe 10.1.2 ci-dessus, ce sujet utilise relativement souvent les stratégies du périmètre (égo) et périmètre-à-objets (allo) qui se révèlent peu adaptées pour l'apprentissage d'une configuration lors de l'exploration des cartes virtuelles de SeaTouch.

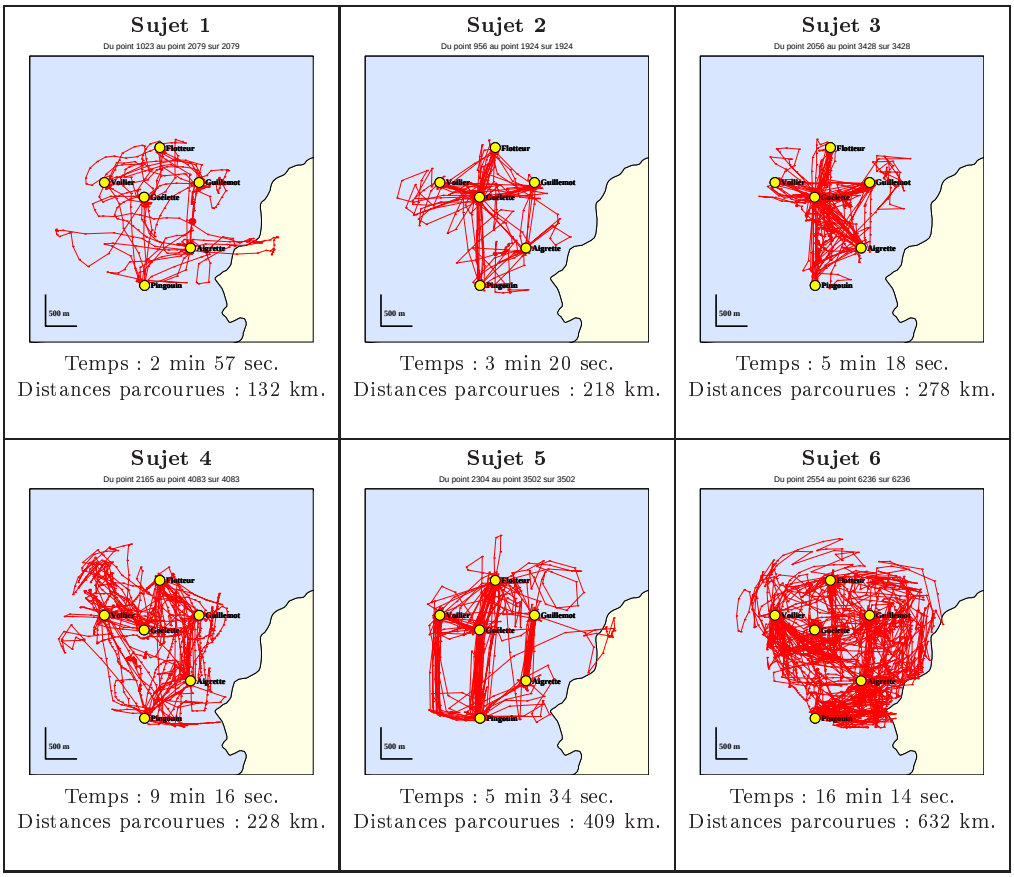


Tableau 10.1 – *Patterns* d'exploration de la phase de d'encodage.

10.2.3.6 Synthèse sur les interprétations des *patterns* d'exploration

Finalement, les sujets dont les *patterns* d'exploration haptique témoignent de la volonté de privilégier la stratégie du point central de référence (allo) déduisent relativement aisément les relations entre les balises à partir d'inférences spatiales. Ils font preuve d'un niveau de développement spatial avancé

et semblent plutôt mettre en œuvre des stratégies cognitives de structuration mentale. A l'inverse les sujets dont les *patterns* d'exploration traduisent l'intention de mémoriser strictement les relations entre les balises de la configuration semblent rencontrer plus de difficultés à effectuer des raisonnements impliquant la coordination des référentiels de types égo et allocentrés. Ils nous paraissent plutôt appliquer des stratégies cognitives de mémorisation locale.

10.2.4 L'efficacité de la stratégie du point central de référence...

10.2.4.1 ... Pour l'inférence spatiale en générale

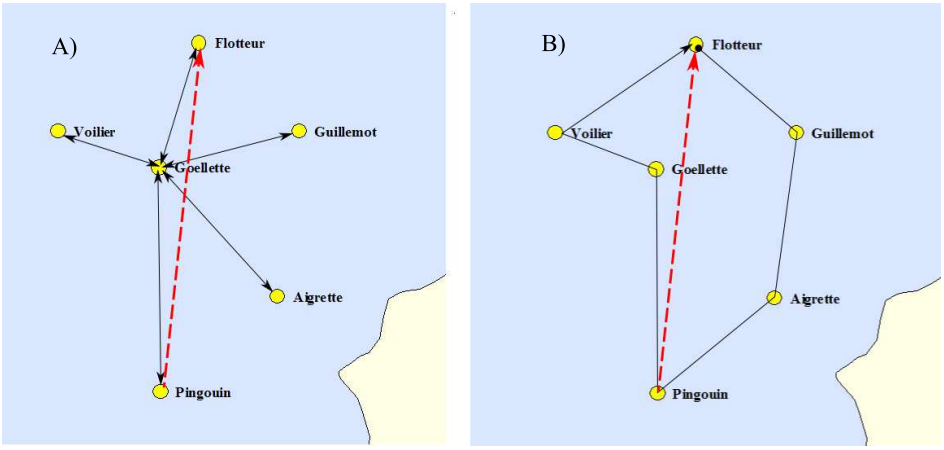


Figure 10.2 – Les traits fins en noirs représentent les *patterns* d'exploration, alors que les traits épais en pointillés rouges correspondent à l'estimation depuis la balise initiale (« Pingouin ») vers la balise finale (« Flotteur »). La figure A illustre le *pattern* d'exploration de la stratégie du point central de référence et la figure B le *pattern* de la stratégie cyclique.

Lors de l'exploration de la carte virtuelle de SeaTouch, si la stratégie du point central de référence (allo) ne permettait pas aux personnes aveugles de réaliser des inférences spatiales précises, les sujets 2 et 3 n'auraient pas pu répondre avec aussi peu d'erreur aux questions excluant la « Goélette ». L'estimation de direction entre le « Flotteur » et le « Guillemot » du sujet 3 en est un exemple. En effet, bien qu'il n'effectue pas le trajet entre ces deux balises, le sujet estime la direction depuis le « Flotteur » vers le « Guillemot » à deux degrés près. Les exemples de ce type sont nombreux. A l'inverse, le sujet 4, qui utilise majoritairement la stratégie cyclique (égo) réalise des estimations de direction bien moins précises. La stratégie cyclique (égo) consiste en la mémorisation de six segments de la configuration dans un ordre donné, alors que la stratégie du point central de référence (allo) vise à établir des relations entre un point de référence et les autres points de la configuration. Ainsi, pour chaque inférence, les sujets ayant utilisé cette stratégie peuvent raisonner sur la base de l'encodage de

deux trajets manuels passant chacun par le repère privilégié de la « Goélette ». Par exemple, pour la question de l'estimation de la direction du « Flotteur » depuis le « Pingouin », le sujet peut se référer au segment allant de la balise initiale (« Pingouin ») à la balise centrale (« Goélette ») et à celui allant de cette balise centrale (« Goélette ») à la balise visée (« Flotteur ») (*cf.* figure 10.2.A). A l'inverse, les sujets ayant adopté la stratégie cyclique (allo), doivent parcourir mentalement les segments qu'ils ont encodés manuellement pour aller de la balise initiale (« Pingouin ») à la balise finale (« Flotteur ») afin de réaliser cette même inférence spatiale. Sur notre exemple, les segments potentiellement sollicités seraient au nombre de trois : « Pingouin »-« Goélette », « Goélette »-« Voilier », « Voilier »-« Flotteur » ou « Pingouin »-« Aigrette », « Aigrette »-« Guillemot » et « Guillemot »-« flotteur ». De plus ces derniers ne peuvent s'appuyer sur un point de référence dont l'encodage a été privilégié (*cf.* figure 10.2B). L'avantage de la stratégie du point central de référence (allo) est de réduire l'incertitude des repères spatiaux utilisés. Il s'agit ici d'une combinaison de deux segments sur cinq passant toujours par le même point de référence. Autrement dit, les sujets utilisent la forme générale d'une étoile pour encoder une représentation de type carte. Les trajets reliant les extrémités de deux branches de cette étoile forment des triangles. Or de nombreuses études témoignent de la réussite de tâches de complétion de triangle en l'absence de vision (Lederman et Klatzky, 1987; Loomis *et al.*, 1993; Klatzky, 1999; Nico *et al.*, 2002; Gentaz et Gaunet, 2006). Ainsi, on peut penser que cette stratégie d'exploration est particulièrement propice aux inférences spatiales en situation de cécité.

10.2.4.2 ... pour la rotation mentale en particulier

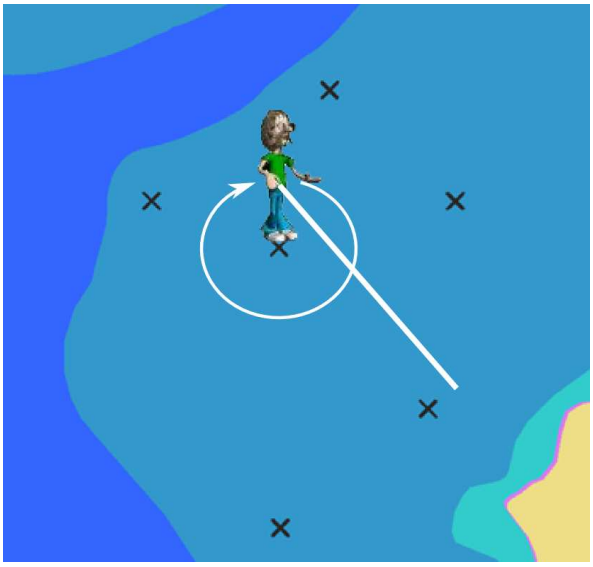


Figure 10.3 – Illustration de la projection du repère de type égocentré du corps dans le référentiel type allocentré de la carte virtuelle de SeaTouch lors de l'utilisation de la stratégie d'exploration haptique du point central de référence.

Dans le cas de la configuration que nous utilisons pour cette expérience de cartographie avec SeaTouch, les *patterns* d'exploration haptique de la stratégie du point central de référence (allo) mis en œuvre par les sujets 2 et 3 ont bien la forme d'une étoile (Tellevik, 1992) dont le centre est la « Goélette » (*cf.* figure 10.2 A). Plus précisément, les orientations des cinq segments dont les sujets privilégient l'encodage correspondent aux cinq orientations intrinsèques à la configuration passant par le point central de référence. On peut penser que les sujets s'imaginent qu'ils sont au centre de la carte et qu'ils pivotent sur eux-mêmes pour faire face aux différentes balises. Cela s'apparente à une projection de leur propre corps (égo) au sein de la carte (allo). De cette manière, ils se projettent dans différentes orientations et se décentrent de leur point de vue initial d'encodage. Ainsi, la rotation mentale semble se trouver facilitée par cette projection du corps au sein de la carte (*cf.* figure 10.3).

Finalement, si le choix d'un repère privilégié et la limitation du nombre de mouvements propres à la stratégie du point de référence (allo) entraînent la stabilité des repères et diminuent la charge cognitive lors de processus ascendants et descendants, la projection au sein de la configuration semble relever plus particulièrement de l'anticipation de la rotation mentale. Cet accès favorisé à un processus de cognition spatiale hybride apparemment efficace semble particulièrement intéressant pour la coordination des référentiels de types égo et allocentrés. Il nécessite cependant un développement spatial avancé.

10.2.5 La nouvelle stratégie de la recherche d'axe intrinsèque à la configuration

Nous avons vu chapitre 9 l'apparition d'un *pattern* d'exploration correspondant à une stratégie de recherche d'« axe intrinsèque à la configuration » (allo) (figure 9.1 p.214). Cette stratégie rappelle les résultats des travaux de Mou *et al.* (2006) (*cf.*2.2.2.5, p.66). Plus précisément, le repérage d'un ou plusieurs éléments alignés le long d'un axe au sein d'une configuration pourrait favoriser l'intériorisation de repères indépendants de l'orientation initiale d'apprentissage. L'utilisation de cet axe propre à la configuration faciliterait l'utilisation d'un référentiel de type allocentré et ainsi les rotations mentales. Notons que le *pattern* de la stratégie de l'axe intrinsèque de référence (allo) n'est pas incompatible avec celui du point de référence (allo).

Comme évoqué au paragraphe ci-dessus 10.1.3, dans le cas de la configuration de la carte virtuelle de SeaTouch, l'axe intrinsèque à la configuration privilégié par les sujets correspond en même temps à l'axe « nord-sud » et à la verticalité repérée grâce à l'invariant gravitaire. Dans ce cas précis, cette stratégie peut fournir un repère autant par rapport au corps du sujet que par rapport à la configuration et semble donc favoriser la construction d'une représentation spatiale structurée et la coordination des référentiels de types égo et allocentrés.

10.2.6 Synthèse sur la carte virtuelle de SeaTouch

L'utilisation de repères spatiaux semble permettre la construction d'une représentation spatiale efficace au cours de l'exploration de la carte virtuelle de SeaTouch (CVi) par les sujets aveugles. Plus précisément, il semble que l'efficacité de la stratégie du point central de référence (allo) provienne de sa capacité à fournir les mêmes invariants pour les différents raisonnements spatiaux.

10.3 Conclusion de la discussion sur l'expérience cartographique

En résumé, il s'avère que la séquentialité imposée par le Phantom, la forme irrégulière du périmètre des cartes virtuelles de SeaTouch (CVi) et la verticalité de leur plan de travail sont des avantages pour l'intériorisation de représentations spatiales structurées. La précision de ces dernières se révèle équivalente à la précision de celles issues de la carte en relief (CeR) alors que les sujets ont l'habitude d'utiliser leurs dix doigts pour percevoir la globalité d'une configuration.

En Cvi, les sujets qui intériorisent des invariants tels qu'un point central de référence et des axes intrinsèques à la configuration se révèlent plus précis pour estimer des directions. Ainsi, la mise en œuvre de cette stratégie d'exploration haptique du point central de référence (allo) peut-être associée à des raisonnement spatiaux s'inscrivant dans une stratégie cognitive de structuration mentale de l'espace. La représentation spatiale construite favorise alors la coordination des référentiels spatiaux de types égo et allocentrés.

Chapitre 11

Méthode de l'expérience de navigation

Dans cette partie nous cherchons à identifier les conditions de navigation virtuelle qui permettent d'aider les marins non-voyants à coordonner les référentiel spatiaux. Nous aspirons également à déterminer les moyens de réaliser des transferts d'apprentissage dans une tâche de repérage depuis des navigations virtuelles vers des navigations en milieu naturel.

Nous comparons donc les performances spatiales des sujets à la suite de navigations virtuelles en mode *Northing* (NO), où l'avatar du voilier se déplace sur une carte virtuelle fixe, et en mode *Heading* (HE), où l'avatar du voilier est immobile mais où la carte pivote et défile autour du voilier (*cf.* § 5.4.2 p.160). Ce second mode propose aux sujets une multiplication de points de vue haptiques au fur et à mesure de la navigation. Nous émettons ainsi l'hypothèse selon laquelle **la navigation virtuelle avec SeaTouch en mode *Heading* (HE) permet aux marins non-voyants de coordonner les représentations s'inscrivant dans les référentiels spatiaux de types égo et allocentrés plus précisément qu'en mode *Northing* (NO) (hypothèse 3)**. Nous analysons donc les précisions des estimations de direction en situations alignées et non alignées à la suite des navigations virtuelles en modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE).

Nous nous intéressons ensuite aux transferts d'apprentissage dans une tâche de repérage depuis une navigation virtuelle vers un déplacement dans l'environnement maritime naturel. Le parcours effectué dans l'environnement virtuel est identique à celui réalisé dans la Rade de Brest. En mode *Heading* (HE), les perceptions spatiales haptiques dépendent de l'orientation du voilier. Ainsi, au cours de ce type de navigation virtuelle les informations tactilo-kinesthésiques sont présentées dans un référentiel similaire à celui de la navigation en milieu naturel. Nous formulons donc l'hypothèse que **la préparation de navigation en mode *Heading* (HE) permet aux marins non-voyants de se situer plus précisément au cours de la navigation réelle que lorsqu'ils la préparent en mode *Northing* (NO) (hypothèse 4).** A la suite des préparations des navigations en mode *Northing* (NO) et *Heading* (HE), nous analysons les précisions des réponses à des questions d'estimations

des directions des différentes balises en cours de navigation en milieu naturel. Ainsi, ces « questions situées », nous renseignent sur la précision avec laquelle les sujets se représentent leur position par rapport à la configuration lorsqu'ils naviguent véritablement.

L'ensemble des tâches permettant de vérifier ces hypothèses est schématisé sur la figure 11.1 ci-dessous et détaillée dans le présent chapitre.

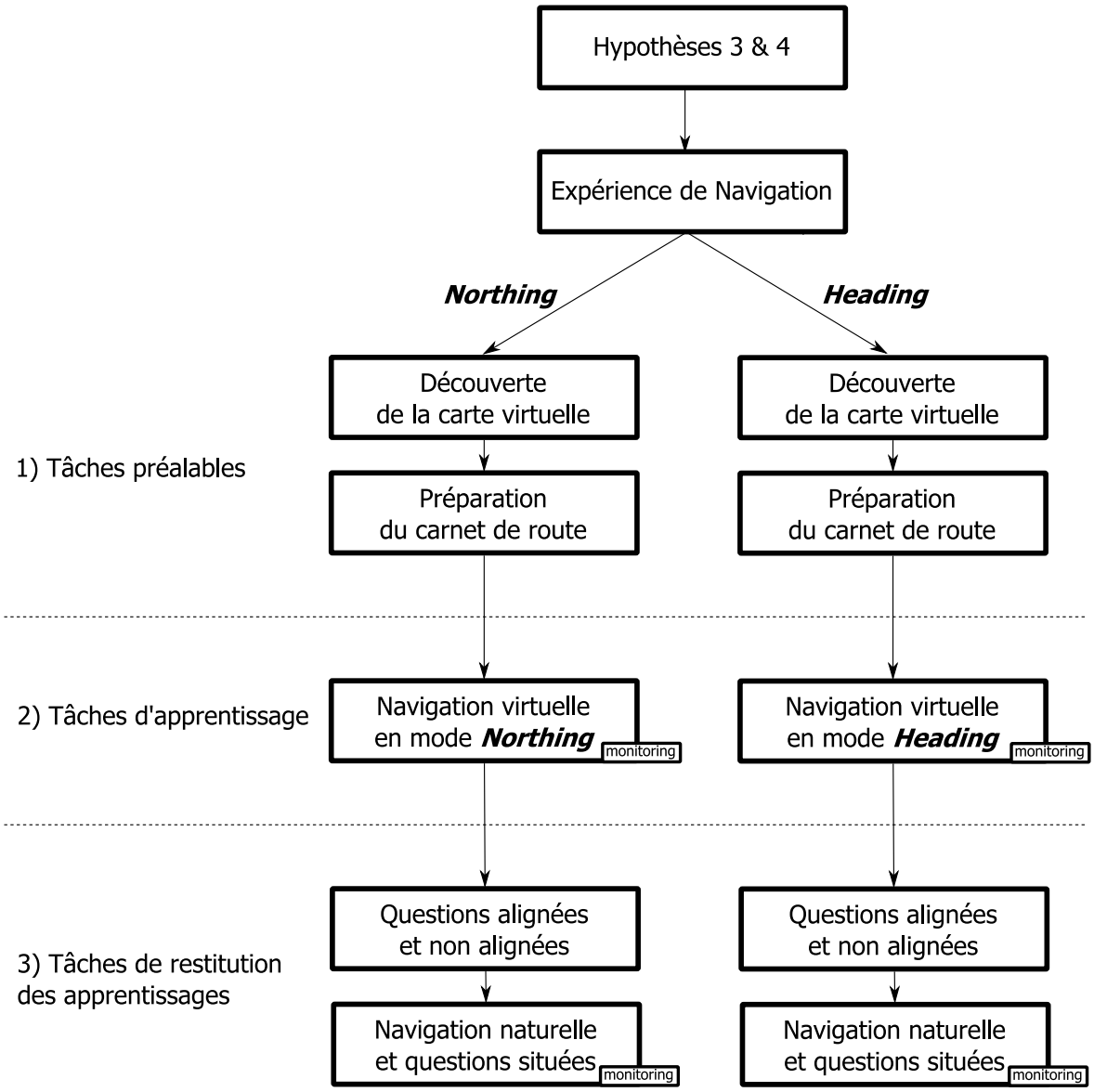


Figure 11.1 – Plan chronologique de l'expérience de navigation.

11.1 Les cartes des navigations virtuelles

Comme présentées au chapitre 6.2 (p.167), les deux cartes adoptées au cours de cette expérience de navigation comportent chacune une configuration de balises identique à celle de l'expérience de cartographie. Cependant, la carte employée en condition *Heading* (HE) est construite à partir d'un axe de symétrie vertical passant par la balise centrale de la configuration de la carte « originale » utilisée en condition *Northing* (NO). Il s'agit donc d'un effet « miroir » (*cf.* 11.2).

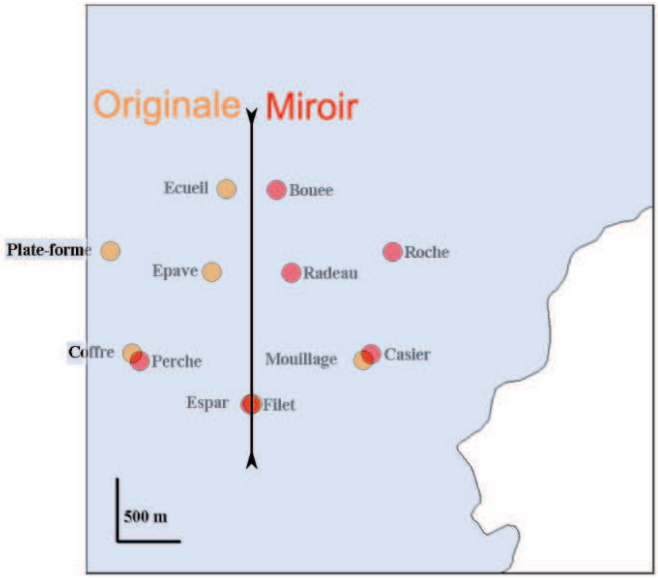


Figure 11.2 – Les cartes « originale » et « miroir » respectivement utilisées pour les conditions *Northing* (NO) et *Heading* (HE) sont équivalentes face à l'effet de l'oblique.

De cette façon, ces cartes sont égales face à l'« effet de l'oblique ».

11.2 La familiarisation avec les navigations virtuelles

Afin de permettre aux sujets de s'entraîner à l'utilisation de SeaTouch dans les modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE), ils disposent chacun d'une demi-journée de navigation virtuelle au poste de travail de cette expérience de navigation (*cf.* figure 11.3).

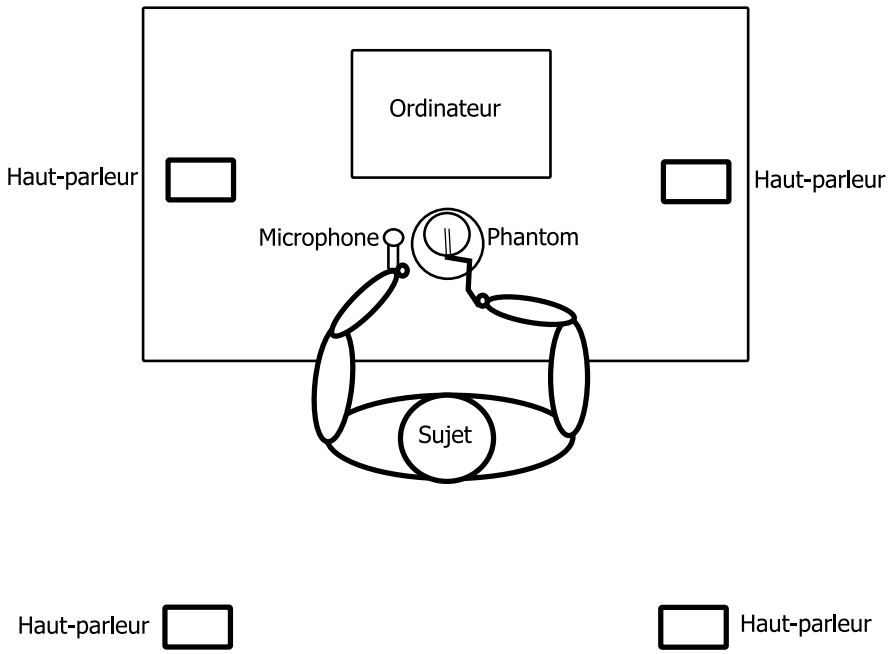


Figure 11.3 – Schéma du poste de travail des navigations virtuelles.

Pendant ces navigations virtuelles nous utilisons une carte d'entraînement sur laquelle les sujets réalisent plusieurs fois l'ensemble des tâches qui constitueront plus tard l'expérience de navigation. Ici le tour du parcours est réalisé dans les deux modes ainsi qu'en vitesse accélérée. Nous arrêtons les entraînements lorsque nous observons que les sujets utilisent toutes les fonctionnalités présentées d'une part, et lorsque ces derniers déclarent maîtriser l'application d'autre part. Nous considérons cependant que cela ne rend pas les sujets experts de SeaTouch ; nos sujets sont donc des marins débutants de l'application.

11.3 Le déroulement de l'expérience de navigation

11.3.1 Les tâches préalables

Bien que les expériences en condition de navigations virtuelles en mode *Heading* (HE) et Northing (NO) ne se déroulent ni au même moment ni sur la même carte, ces dernières suivent néanmoins une procédure commune lors des tâches préalables de découverte de la carte et de préparation du carnet de route. Ces tâches préalables communes sont présentées ci-dessous.

11.3.1.1 La découverte de la carte

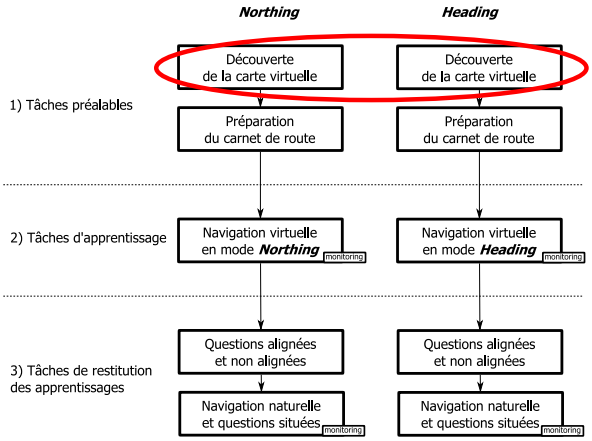


FIGURE 11.4 – Positionnement de la tâche de découverte de la configuration au sein de l'expérience de navigation.

La première des deux tâches préalables communes aux deux conditions consiste à découvrir la carte (*cf.* figure 11.4). Au cours de celle-ci, il est demandé aux sujets d'explorer la carte de SEATOUCH afin de découvrir et mémoriser les positions et les noms des six balises peuplant l'environnement maritime. L'exploration prend fin lorsque les sujets déclarent avoir atteint cet objectif.

La connaissance de cet environnement permet aux sujets de comprendre les consignes de la phase de préparation du carnet de route. La phase d'exploration est donc un pré-requis pour la phase suivante.

11.3.1.2 La préparation du carnet de route

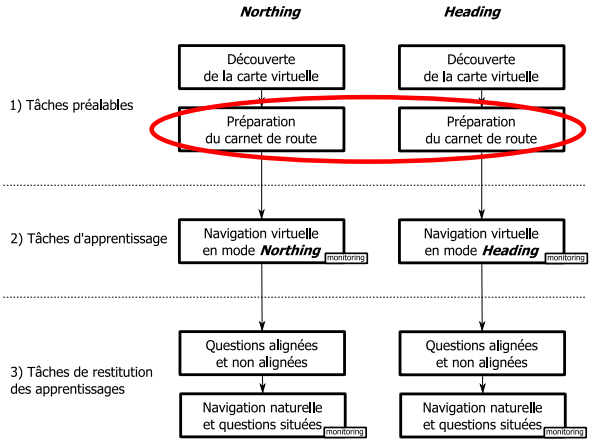


FIGURE 11.5 – Positionnement de la tâche de préparation du carnet de route au sein de l'expérience de navigation.

La seconde des deux tâches préalables communes vise la préparation du carnet de route (*cf.* figure 11.5). La route est une succession de balises à contourner annoncée par l'expérimentateur (*cf.* tableau 11.1).

Etapes	**Contournement NO**	**Contournement HE**
Départ	entre la *Bouée* et le *Radeau*	entre l'*Ecueil* et l'*Epave*
1.	La *Roche* à tribord	la *Plate-forme* à bâbord
2.	Le *Casier* à tribord	le *Coffre* à bâbord
3.	Le *Filet* à tribord	l'*Espar* à bâbord
4.	La *Perche* à tribord	le *Mouillage* à bâbord
Arrivée	entre la *Bouée* et le *Radeau*	entre l'*Ecueil* et l'*Epave*

Tableau 11.1 – Routes décrites par l'expérimentateur lors de la tâche de préparation du carnet de route en condition *Northing* (NO) et *Heading* (HE) (« contournement à tribord » signifie que le sujet doit « laisser » la balise du côté droit du voilier).

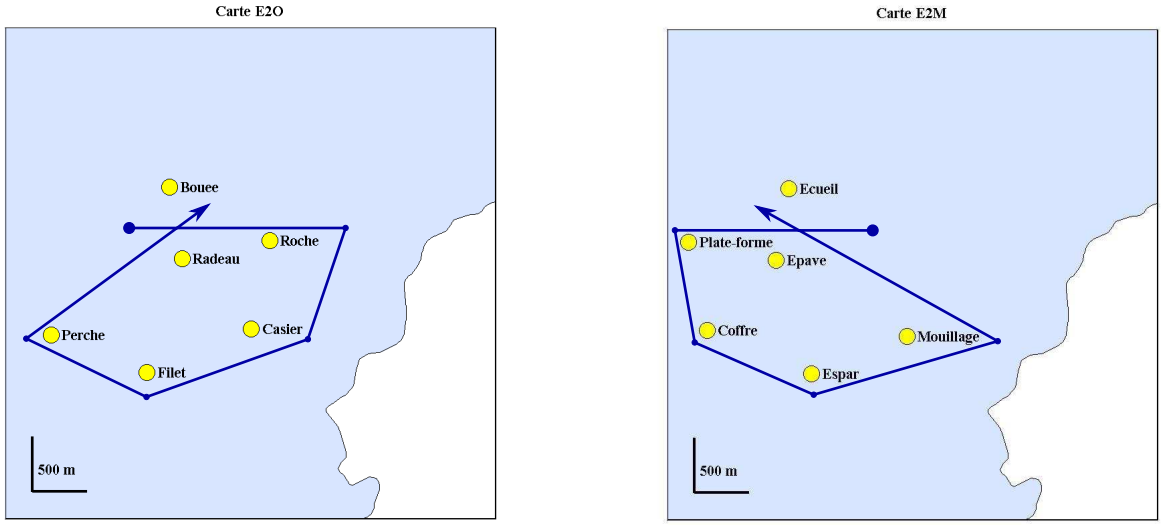


Figure 11.6 – Trajectoires impliquées par les routes avec du vent de nord. L'itinéraire représenté sur la carte E2O (à gauche) est utilisé pour la condition *Northing* (NO). L'itinéraire dessiné sur la carte E2M (à droite) correspond à la condition *Heading* (HE).

Cette expérience est la première que les sujets réalisent avec le voilier virtuel de SeaTouch. Comme évoqué précédemment, ils sont débutants avec cette application. Afin d'éviter d'introduire des différences dues à la rapidité avec laquelle les sujets se familiarisent avec l'application d'une part,

et dans le but de limiter l'influence de leur niveau variable en voile d'autre part, nous avons choisi d'utiliser peu de fonctionnalités de SeaTouch et de proposer aux sujets des routes relativement simples. Plus précisément, ces dernières ont été construites de façon à ne pas nécessiter de louvoyer (« zig-zaguer » face au vent) lorsque le vent souffle du nord ($\pm 20^\circ$).

Afin de préparer les sujets aux navigations naturelles, il leur est demandé d'enregistrer un carnet de route dont ils disposeront au cours des navigations virtuelles et réelles. Ce carnet de route détaille les caps, les distances et les *allures* (angles voilier-vent) des six segments de la route qu'ils devront réaliser (*cf.* tableau 11.2). L'expérimentateur veille à ce que chaque segment de route soit détaillé selon ces trois informations.

Segment 1
Cap 1 : 95°
Distance 1 : 700 mètres
Allure 1 : « au près »
Segment 2
etc, ...

Tableau 11.2 – Exemple d'un segment de carnet de route.

Pour créer ce carnet de route, les sujets consultent la carte de SeaTouch en utilisant les commandes vocales définies dans le tableau 11.3 ci-dessous.

Commandes	Informations
« Origine »	Définit l'origine d'une mesure depuis l'emplacement du curseur haptique
« Mesure »	Annonce la mesure (cap en degrés cardinaux et distance en km) entre le curseur et l'origine

Tableau 11.3 – Commandes et informations disponibles pour les sujets pendant la phase de préparation d'itinéraire.

L'expérimentateur annonce la route aux sujets segment par segment. Au fur et à mesure des annonces, les sujets effectuent des mesures de distance et d'orientation en utilisant la commande « Mesure ». Ils établissent ainsi leur carnet de route. Afin de pouvoir respecter l'itinéraire préparé. Dans un souci d'ergonomie pour la suite de l'activité du sujet, ce carnet de route est conservé par l'expérimentateur.

Cette phase de préparation du carnet de route se termine lorsque les caractéristiques des cinq segments sont enregistrés.

11.3.2 Les tâches d'apprentissage

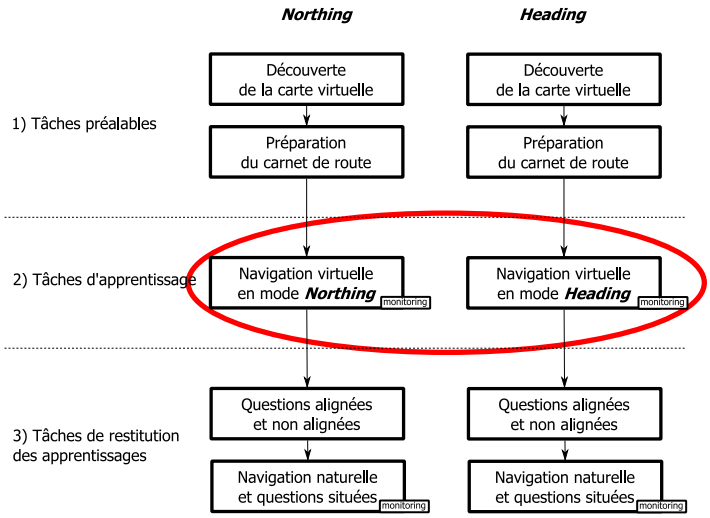


Figure 11.7 – Positionnement des tâches d'apprentissage au sein de l'expérience de navigation.

In Virtuo, le vent reste stable en direction et en orientation et le courant est nul. La tâche commence sur la ligne de départ, voilier face au vent, et prend fin lorsque la ligne d'arrivée est franchie. Si le sujet fait naufrage en percutant une balise ou la côte, la tâche est suspendue et reprend depuis la position du naufrage une fois que le sujet a modifié son cap.

Au cours des tâches de navigations virtuelles, les sujets tiennent le poste de navigateur dans l'environnement marin réifié par SeaTouch. La tâche consiste à réaliser la route détaillée pendant de la phase précédente (*cf.* § 11.3.1.2).

- **Les commandes utilisées par les sujets**

Comme décrit au paragraphe 5.2.1.1 (p.156), les sujets peuvent rechercher le voilier virtuel en exerçant une pression sur un bouton se trouvant sur le Phantom. L'interface haptique déclenche alors un champ attracteur en direction de la cible et annonce « Sirius » lorsque cette dernière est atteinte.

Les sujets dirigent leur embarcation virtuelle en annonçant des commandes vocales dans le microphone. Les mots reconnus comme commandes sont listés dans le tableau 11.4 ci-dessous.

Commandes	Actions effectuées
« tribord 1 »	tourne d'1 degré à tribord
« tribord 10 »	tourne de 10 degrés à tribord
« tribord 90 »	tourne de 90 degrés à tribord
« bâbord 1 »	tourne d'1 degré à bâbord
« bâbord 10 »	tourne de 10 degrés à bâbord
« bâbord 90 »	tourne de 90 degrés à bâbord

Tableau 11.4 – Liste des commandes vocales. Lorsque les sujets prononcent un mot de commande, le voilier exécute l'action correspondante.

In Virtuo, le voilier se déplace selon les caractéristiques de vitesse (« polaire de vitesse ») du véritable *Sirius*. Autrement dit, la vitesse de déplacement du voilier au cours de la simulation dépend de son angle d'incidence avec le vent et de la force de celui-ci. Ainsi lorsque le voilier est orienté face au vent, ce dernier ne se déplace plus.

- **Les informations disponibles**

→ Les informations sonores spatialisées

Au cours des navigations virtuelles, qu'il s'agisse des modes *Northing* (NO) ou *Heading* (HE) les sujets perçoivent les sons du vent et des balises en fonction de leurs azimuts respectifs grâce au positionnement des haut-parleurs (*cf.* figure 11.8).

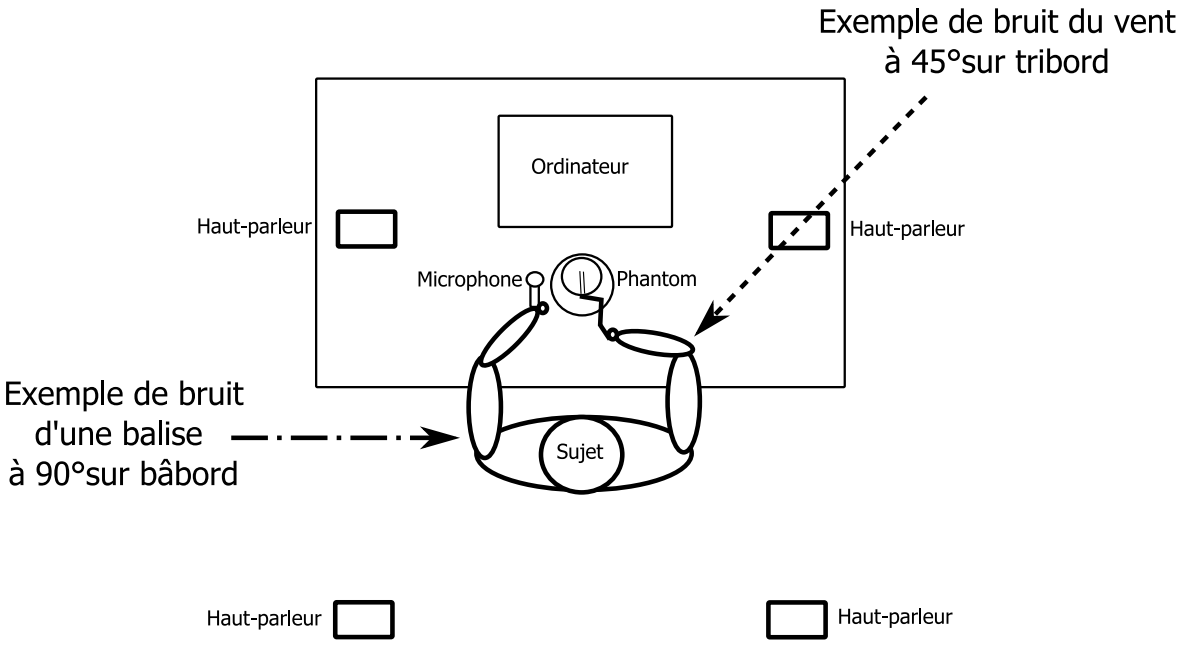


Figure 11.8 – Schéma illustrant les informations auditives spatialisées perçues au cours des navigations virtuelles.

Lorsque le voilier reçoit le vent apparent à 45° sur tribord, les sujets perçoivent effectivement la source sonore du vent à 45° à droite (*cf.* §5.2.2.1 p. 157).

En ce qui concerne les balises, seule la plus proche se trouvant dans un rayon de cinq cent mètres émet un son de cloche dont l'intensité varie en fonction de la distance. Ce son change lorsque la balise la plus proche n'est plus la même. Par exemple, si le voilier se trouve à plus de cinq cent mètres de toutes balises, aucun son de cloche n'est audible. S'il se rapproche ensuite à moins de cinq cent mètres d'une balise, le sujet entendra alors un son de cloche en fonction de son azimut. Finalement, si le voilier se trouve plus proche d'une autre balise le son de cloche changera et prendra alors l'azimut de cette seconde balise (*cf.* §5.2.2.2 p. 158).

Les informations auditives spatialisées sont identiques en modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE), elles ne constituent donc pas une variable dépendante.

→ Les informations vocales

Au cours de la simulation de navigation, les sujets ont accès aux informations de cap et vitesse du voilier. Des précisions sur l'azimut et la distance de la balise la plus proche sont également disponibles. Les mots reconnus comme demande d'informations sont décrits dans le tableau 11.5 ci-dessous.

Mots	Informations	Annonces
« Cap »	cap du voilier	« cap 135° »
« Vitesse »	vitesse du bateau	« vitesse 4,1 noeuds »
« Balise »	azimut et distance	« radeau : 5h, 390m »

Tableau 11.5 – Informations de navigation disponibles pour les sujets en cours de navigation virtuelle. Lorsque les sujets prononcent un mot d'information, l'annonce vocale correspondante est déclenchée.

Finalement, les informations vocales sont identiques en modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE), elles ne constituent donc pas une variable dépendante.

La variable dépendante réside dans le type de référentiel spatial des mouvements d'exploration haptique en cours des navigations virtuelles.

11.3.2.1 La navigation virtuelle en mode *Northing* (NO)

En mode *Northing* (NO), la configuration est stable et fixe (*cf.* § 5.4.2.1 p.160). Chaque balise peut constituer un repère haptique dont la position ne sera pas modifiée au sein de la « vue haptique ». A l'inverse, le voilier est mobile, sa position et son orientation sont actualisées en permanence sur la carte virtuelle. Cette vue haptique s'inscrit dans un référentiel de type allocentré (*cf.* figure 11.9).

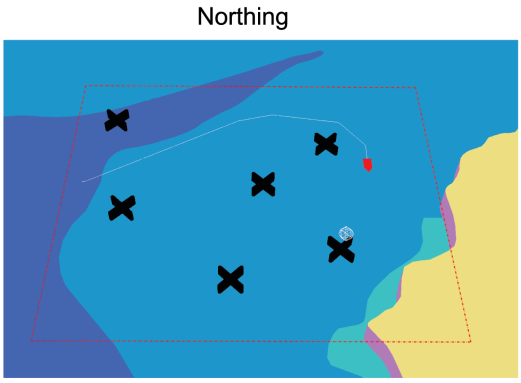


Figure 11.9 – Carte d'entraînement à la navigation avec SeaTouch en mode *Northing* (NO). Le carré en pointillés rouges représente approximativement l'espace de travail du Phantom. Ce dernier ne change pas au fur et à mesure de la navigation virtuelle en mode *Northing* (NO).

11.3.2.2 La navigation virtuelle en mode *Heading* (HE

La vue haptique du mode *Heading* (HE) s'oppose à celle du mode *Northing* (NO) (*cf.* § 5.4.2.2 p.161). Ici, le voilier se trouve au milieu de l'espace de travail et reste stable et fixe. Par contre, au cours de la navigation les balises de la configuration effectuent des mouvements de translation lorsque

le voilier avance et des mouvements de rotation autour du voilier lorsqu'il change d'orientation. Ces positions relatives entre le voilier et les balises de la configuration s'inscrivent dans un référentiel de type égocentré de la même manière que lors d'une navigation en situation naturelle (*cf.* figure 11.10).

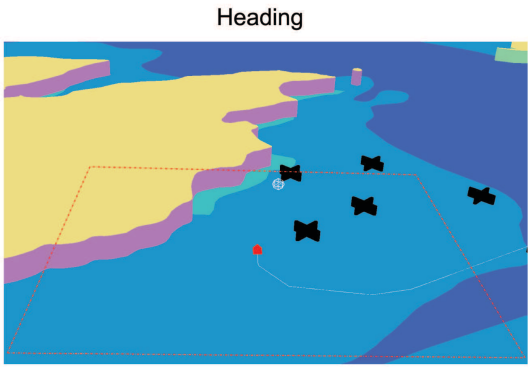


Figure 11.10 – Carte d'entraînement à la navigation avec SeaTouch en mode *Heading* (HE). Le carré en pointillés rouges représente approximativement l'espace de travail du Phantom. On voit ici que toutes les balises de la configuration ne sont pas accessibles. En mode *Heading* (HE), le contenu de l'espace de travail change au fur et à mesure de la navigation virtuelle.

Finalement, la variable dépendante réside dans le type de référentiel spatial des mouvements d'exploration haptique en cours des navigations virtuelles.

11.3.2.3 L'entraînement aux questions situées.

Pendant les navigations virtuelles, l'expérimentateur suspend la navigation au milieu de chaque segment de la route. Il demande alors aux sujets d'estimer les positions de trois balises de la configuration depuis la position et l'orientation actuelle du voilier. Les sujets n'ont accès à aucune information haptique, auditive ou vocale et répondent en utilisant le rapporteur breton (*cf.* §6.3.1 p.168). Ces derniers imaginent que l'outil se trouve à bord du voilier dans l'axe de son cap avant de diriger le viseur dans la direction où ils estiment que se trouve la balise évoquée par l'expérimentateur.

Répondre aux « questions situées » demande aux sujets de se repérer par rapport à la configuration. Plus précisément, nous entendons ici par « se repérer » l'action de situer le voilier virtuel en cours de route en précisant les relations spatiales de directions de trois différentes balises de la configuration dans un référentiel de type égocentré.

11.3.3 Les tâches de restitution des apprentissages

11.3.3.1 Les questions alignées et non alignées

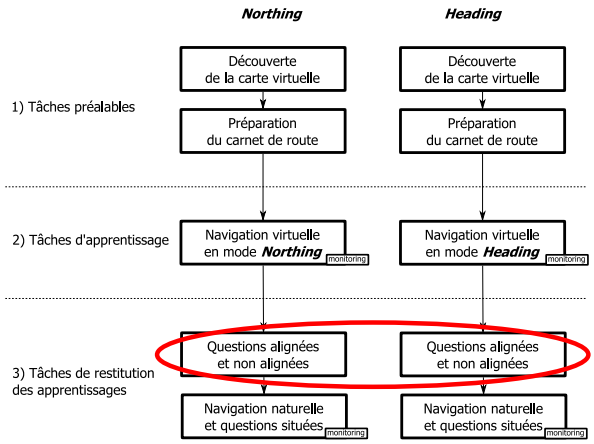


Figure 11.11 – Positionnement des questions alignées et non alignées au sein des tâches de restitution des apprentissage de notre expérience de navigation.

A la suite des navigations virtuelles en mode *Northing* (NO) et *Heading* (HE), les sujets répondent à dix huit questions alignées et non alignées (*cf.* figure 11.11). Ainsi, de la même manière que pour l'expérience de cartographie, nous sommes en mesure d'appliquer la méthode de la convergence projective.

11.3.3.2 La navigation en situation naturelle et les questions situées

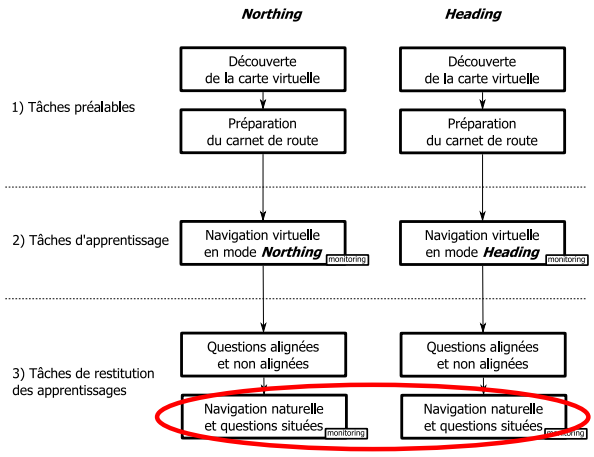


Figure 11.12 – Positionnement des questions situées au sein des tâches de restitution des apprentissage de notre expérience de navigation

- **La navigation en situation naturelle**

La navigation en milieu naturel vise à évaluer les transferts d'apprentissage depuis les cartes de SeaTouch en mode *Northing* (NO) ou *Heading* (HE) vers l'environnement maritime naturel (*cf.* figure 11.12). Plus précisément, nous évaluons la précision du repérage des sujets lorsqu'ils naviguent réellement.

Au cours de cette navigation en milieu naturel, les sujets disposent exclusivement des informations vocales de cap et de vitesse du voilier, ainsi que de l'azimut et de la distance de la balise la plus proche. Afin de neutraliser les effets du courant, nous utilisons les informations issues du G.P.S.. En effet, les informations issues du GPS calculent le cap et la vitesse à partir de la différence entre deux dernières positions absolues successives. La dérive ou les variations de vitesse dues au courant sont donc intégrées aux informations proposées aux sujets. Ces dernières sont accessibles par reconnaissance vocale grâce au matériel informatique (ordinateur) et audio (microphone et haut-parleurs) embarqué.

Il est demandé aux sujets de tenir le poste de navigateur pour réaliser la route préparée précédemment. Ce poste implique la prise de décision sur les caps à suivre à partir de la consultation des informations vocales disponibles à la demande (cap et vitesse du voilier, azimut de la balise la plus proche).

Le rôle du navigateur ne consiste donc pas à barrer mais à indiquer les caps à suivre. Afin de minimiser les biais expérimentaux dus aux erreurs humaines, nous utilisons un « pilote automatique ». Cet outil se compose d'un compas électronique couplé avec un vérin électrique fixé sur le pont du bateau et articulé avec la barre du navire. Notre pilote est doté de quatre boutons. Les touches « *-10* », « *+10* », « *-1* » et « *+1* » font varier le cap du voilier d'autant. Par ailleurs, les appuis simultanés sur « *-10* » et « *-1* » ou sur « *+10* » et « *+1* » modifient respectivement le cap du voilier de -90 et +90. La disposition et la texture des boutons du pilote automatique le rendent naturellement accessible aux personnes privées de la vue. Aussi, les sujets l'utilisent de façon autonome au cours de cette tâche. Afin de pouvoir accéder aux informations vocales et aux commandes du pilote, les sujets évoluent sur le pont du navire.

Les voiles sont réglées par l'expérimentateur au fur et à mesure des changements de cap afin de ne pas introduire le biais des différentes capacités des sujets à régler les voiles.

Nous utilisons des points de route pour rejoindre les mêmes positions de départ que celles pratiquées lors des navigations virtuelles. Ainsi, dès que SeaTouch annonce « départ atteint et désactivé », la tâche commence. Les sujets dirigent alors le voilier tout au long de la route qu'ils ont préparée.

- **Les questions situées**

Afin d'être en mesure d'utiliser la convergence projective pour évaluer la qualité du repérage des sujets au sein de la configuration de balises, l'expérimentateur pose trois questions situées au milieu de chaque segment. La route comporte cinq portions. Cinq questions situées sont donc posées. Les

sujets répondent en orientant leur bras entier dans la direction estimée (*cf.* figure 11.13). L'expérimentateur relève les orientations cardinales au moyen d'un compas de relèvement. Plus précisément, l'expérimentateur se place derrière le sujet et aligne le compas de relèvement avec la direction pointée. Nous accordons la précision de $\pm 5^{\circ}$ à la direction ainsi relevée.

Figure 11.13 – Réponse à une question située en cours de navigation.

De cette manière, pour chaque segment, nous obtenons trois erreurs angulaires (Ea) correspondant chacune à la différence d'angle entre la direction exacte de la balise et l'estimation réalisée par le sujet (*cf.* figure 11.14).

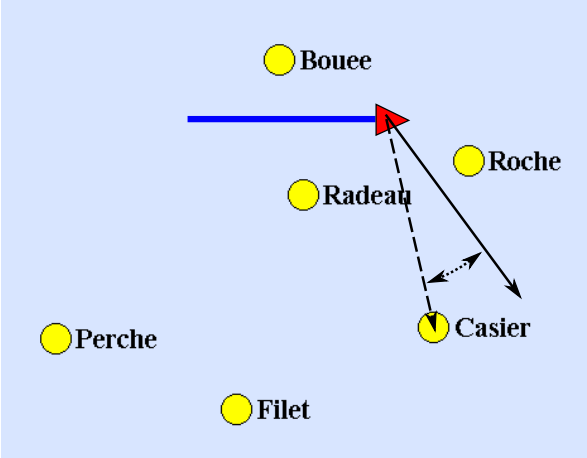


Figure 11.14 – « Erreur angulaire située ». Le trait bleu épais correspond à la trajectoire du voilier. Le petit triangle rouge représente la position du voilier au moment de la demande d'estimation de la direction du « Casier ». La flèche en trait plein illustre la direction estimée. Celle en tirets indique la direction exacte. L'écart entre ces deux directions correspond à « l'erreur angulaire située » (Ea située). Elle est représentée par la double flèche en pointillés.

Au moyen de la technique de la triangulation, nous obtenons également une localisation cognitive et un triangle d'erreur pour sur chaque segment (*cf.* figure 11.15).

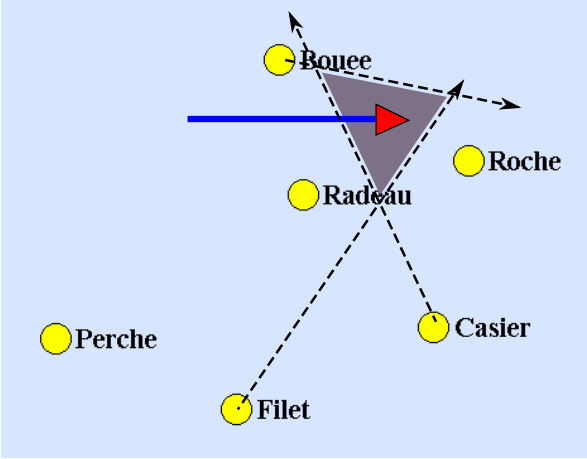


Figure 11.15 – « Triangle d'erreur situé ». Les flèches en tirets correspondent aux estimations des « Bouée », « Casier » et « Filet » depuis le voilier que nous avons translaté sur leur balise respective. Ainsi, le triangle grisé correspond à la triangulation de ces estimations de direction.

Les distances entre les localisations cognitives des positions effectives (Dte situées) et les aires des triangles d'erreurs (Ate situées) nous indiquent respectivement la précision et la cohérence des représentations que se font les sujets de leur position par rapport à la configuration.

La précision des réponses aux questions situées mesure donc la capacité des sujets à se repérer au cours de la navigation. Cette tâche de repérage semble solliciter la coordination des référentiels de types égo et allocentrés. Cependant elle diffère de la tâche de réponse aux questions non alignées dans le sens où les sujets n'imaginent pas une position et une orientation mais les perçoivent. Ainsi, la position et l'orientation courante sont au moins perçues à travers l'historique de la navigation que les sujets réalisent. En effet, la tâche de repérage consiste à estimer les relations de ces positions et orientations perçues par rapport aux balises de la configuration qui ne sont pas perçus mais mémorisés. Finalement alors que répondre aux questions non alignées implique de raisonner sur des représentations exclusivement, répondre aux questions situées entraîne des raisonnements sur des perceptions et des représentations.

Chapitre 12

Résultats après la navigation virtuelle

Entre ce chapitre et le précédent, les cinq premiers sujets ont réalisé l'expérience de navigation en mode *Northing* (NO) ou en mode *Heading* (HE). Le sujet 6 s'est révélé indisponible. La navigation virtuelle permettant d'apprécier la configuration depuis différents points de vue haptique, nous avons émis l'hypothèse selon laquelle **la navigation virtuelle avec SeaTouch en mode *Heading* (HE) permet aux marins non-voyants de coordonner les représentations s'inscrivant dans les référentiels spatiaux de types égo et allocentrés plus précisément qu'en mode *Northing* (NO) (hypothèse 3)**. D'un point de vue opérationnel, si les réponses aux questions non alignées sont meilleures en mode *Heading* (HE) qu'en mode *Northing* (NO) alors l'hypothèse 3 se vérifie.

Nous procédons ici au traitement statistique des données issues des trois niveaux de représentation spatiale décrits dans la méthodologie générale (6.4 p.171). Nos échantillons de résultats ne respectant pas la loi normale, nous utilisons le test statistique non paramétrique de comparaison appariée de Wilocoxon. Nous adoptons un seuil de signification à $p<.05$.

De la même manière que lors de l'expérience précédente, nous analysons les réponses des sujets aux questions alignées et non alignées faisant suite aux navigations virtuelles en mode *Northing* (NO) et *Heading* (HE).

12.1 L'alignement

Existe-t-il des différences entre les réponses aux questions alignées et non alignées tout mode de navigation virtuelle et tout sujet confondus ?

12.1.1 Niveau des directions

En situation alignée, les Ea sont de 15° (± 13) alors qu'en situations non-alignées, elles sont de 22° (± 16) (*cf.* figure 12.1).

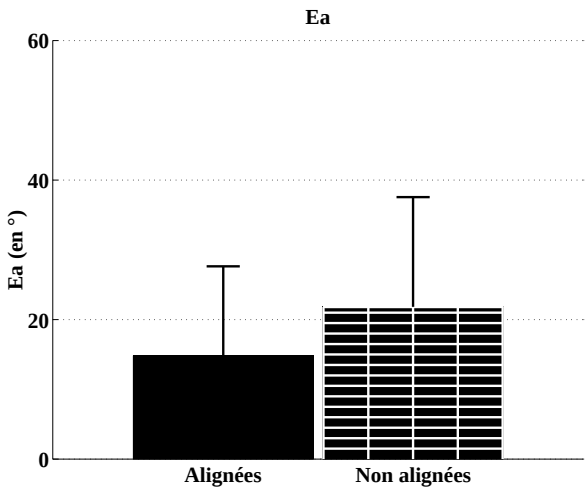


Figure 12.1 – Moyennes et Ecart-types des erreurs angulaires (Ea) en degrés en fonction de l'alignement.

L'analyse statistique révèle une différence significative (Z=4.91) en fonction de l'alignement.

En résumé, au niveau des directions, les performances obtenues lors des réponses aux questions alignées sont meilleures que celles issues des réponses aux questions non alignées.

12.1.2 Niveau des localisations

12.1.2.1 Les erreurs de distance (Dte)

En situation alignée, les Dte sont de 1,0 km (± 2,0), alors qu'en situation non alignée, elles sont de 1,66 km (± 2,8) (*cf.* figure 12.2).

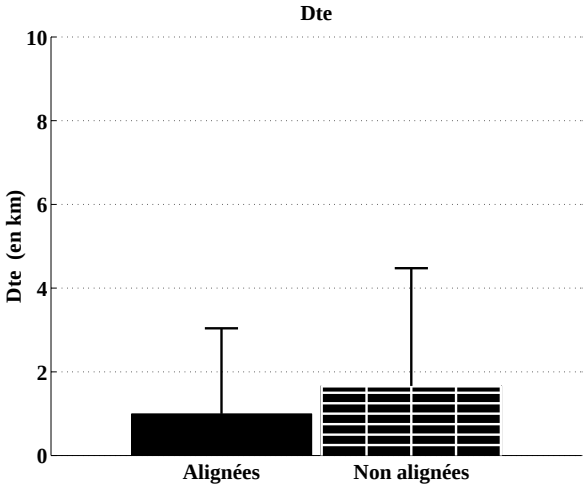


FIGURE 12.2 – Moyennes et Ecart-types des erreurs de distances (Dte) en kilomètres en fonction de l'alignement.

On observe une différence significative (Z=3.38) entre les situations alignées et non alignées.

Les performances obtenues lors des réponses aux questions alignées sont significativement meilleures que celles issues des questions non alignées.

12.1.2.2 Les aires des triangles d'erreurs (Ate)

En situation alignée, les Ate sont de 1,01 km^2 (± 2,62) alors qu'en situation non alignée, elles sont de 2,47 km^2 (± 5,11 (*cf.* figure 12.3).

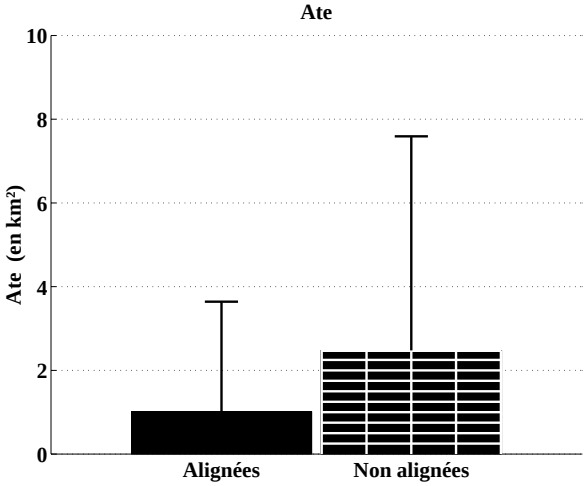


FIGURE 12.3 – Moyennes et Ecart-types des aires des triangles d'erreurs (Ate) en kilomètres carrés en fonction de l'alignement.

Il existe une différence significative (Z=3.97) entre les situations alignées et non alignées.

De la même manière que lors de l'analyse statistique des Dte, les Ate obtenues lors des réponses

aux questions alignées sont significativement inférieures à celles issues des réponses aux questions non alignées.

En résumé, au niveau des localisations, les performances issues des situations alignées sont meilleures que les performances issues des situations non alignées.

12.1.3 Niveau des configurations

12.1.3.1 Le coefficient de corrélation (r)

En situation alignée, les r sont de 0,78 (± 0,21), alors qu'en situation non alignée, ils sont de 0,51 (± 0,30) (*cf.* figure 12.4).

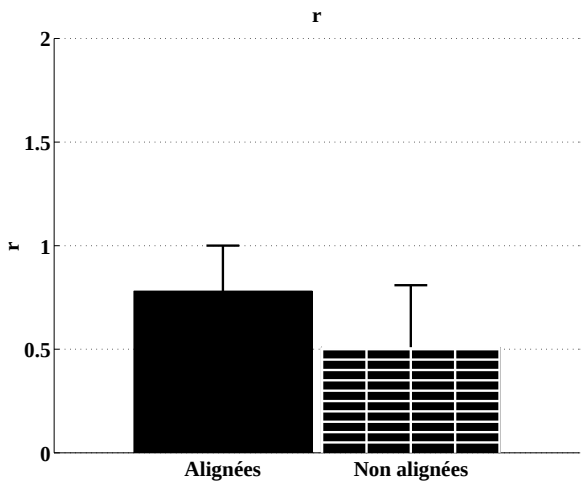


Figure 12.4 – Moyennes et Ecart-types du coefficient corrélation (r) en fonction de l'alignement.

Il existe une différence significative (Z=2.29) entre les situations alignées et non alignées.

Les performances obtenues lors des réponses aux questions alignées sont significativement meilleures que celles issues des réponses des questions non alignées.

12.1.3.2 La distorsion (DI)

En situation alignée, les DI sont de 54 (± 24) alors qu'ils sont de 79 (± 21) en situation non alignée (*cf.* figure 12.5).

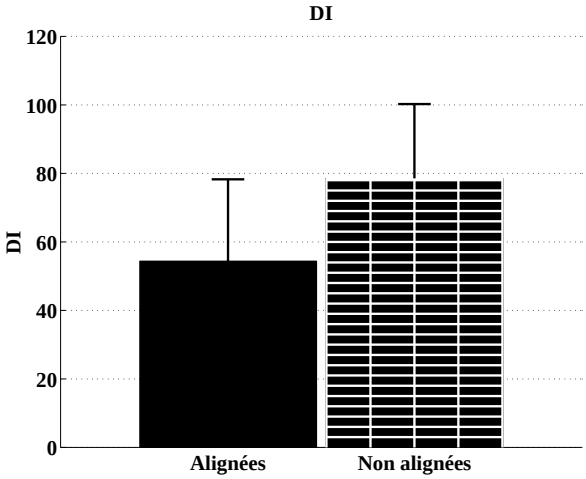


FIGURE 12.5 – Moyennes et Ecart-types de l'index de distorsion en fonction de l'alignement.

Il existe une différence significative (Z=2.40) entre les situations alignées et non alignées.

De la même manière que pour la variable r, les performances obtenues lors des réponses aux questions alignées sont significativement meilleures que celles issues des questions non alignées.

En résumé, au niveau des configurations, les performances issues des situations alignées sont donc meilleures que les performances obtenues lors des situations non alignées.

12.1.4 Synthèse sur l'alignement

Niveaux	Directions	Localisations		Configurations	
Variables	Ea	Dte	Ate	r	DI
Différences à p<.05 selon **Wilcoxon**	**Alignées < Non Alignées (Z=4.91)**	**Alignées < Non Alignées (Z=3.38)**	**Alignées < Non Alignées (Z=3.97)**	**Alignées > Non Alignées (Z=2.29)**	**Alignées < Non Alignées (Z=2.40)**

FIGURE 12.6 – Synthèse des comparaisons des réponses aux questions alignées et non alignées aux niveaux des directions et des localisations et des configurations selon le test statistique de Wilcoxon à p<.05. A l'exception de la variable r, nous rappelons que plus les valeurs des variables sont faibles, meilleures sont les réponses.

Finalement, tout mode de navigation virtuelle et tout sujet confondus, les analyses des variables des trois niveaux de représentation traduisent de meilleurs résultats lors des réponses aux questions alignées que lors des réponses aux questions non alignées.

12.2 Les modes de navigation virtuelle

Existe-t-il des différences entre les performances spatiales issues des navigation virtuelle en mode *Northing* (NO) et *Heading* (HE) tout sujet et tout alignement confondus ?

12.2.1 Niveau des directions

A la suite des navigations virtuelles, les Ea sont de 18° (± 15) en NO et de 18° (± 14) en HE (*cf.* figure 12.7).

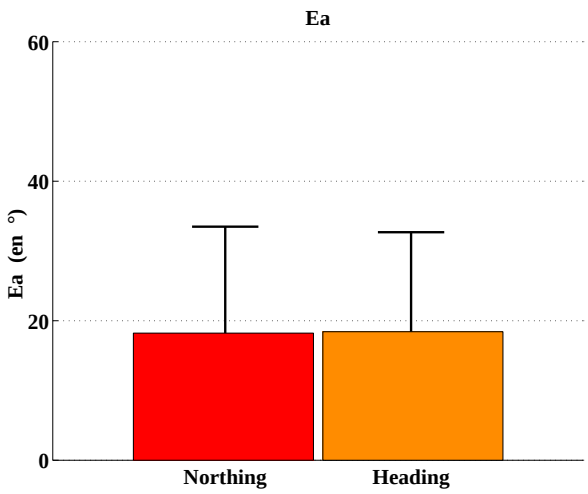


Figure 12.7 – Moyennes et Ecart-types des Ea en degrés en fonction des modes de navigation virtuelle

La comparaison des Ea issues des NO et HE ne révèle pas de différence significative (Z=0.07).

En résumé, au niveau des directions, les performances obtenues à la suite de navigations virtuelles en mode *Heading* (HE) sont équivalentes à celles obtenues en mode *Northing* (NO) .

12.2.2 Niveau des localisations

12.2.2.1 Les erreurs de distance (Dte)

En NO, les Dte sont de 1,0 km (± 1,1) alors qu'elles sont de 1,7 km (± 3,3) en HE (*cf.* figure 12.8).

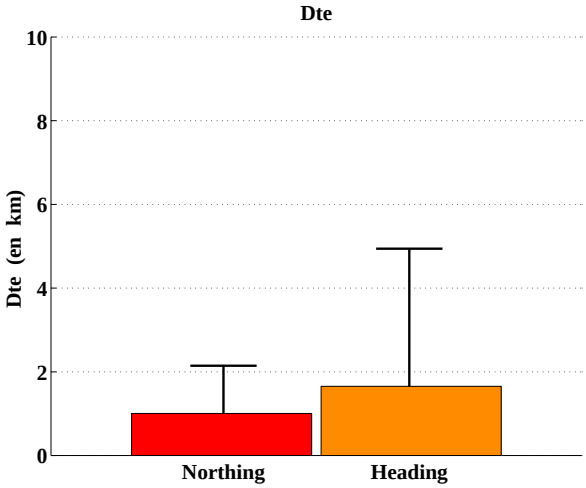


Figure 12.8 – Moyennes et Ecart-types des distances d'erreur (Dte) en kilomètres en fonction des modes de navigation virtuelle.

L'analyse statistique ne révèle pas de différence significative entre les Dte obtenues en NO et HE (Z=0.31).

Les performances obtenues en NO sont donc équivalentes à celles obtenues en HE.

12.2.2.2 Les aires des triangles d'erreurs (Ate)

Les Ate obtenues en NO sont de 1,3 km^2 (± 2,3) alors que celles issues de HE sont de 2,2 km^2 (± 5,4) (*cf.* figure 12.9).

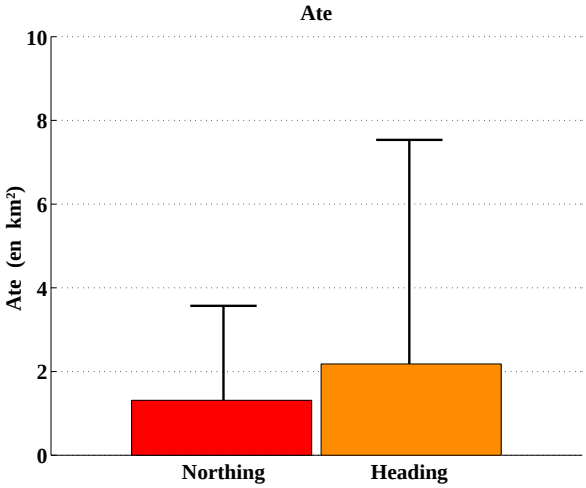


Figure 12.9 – Moyennes et Ecart-types des aires des triangles (Ate) d'erreur en kilomètres carrés en fonction des modes de navigation virtuelle.

L'analyse statistique ne révèle pas de différence significative entre les Ate obtenues en NO et en

HE (Z=0.41).

Les performances obtenues en NO et HE sont donc équivalentes.

En résumé, au niveau des localisations, les analyses des variables montrent que les performances obtenues à la suite d'une navigation virtuelle en mode *Northing* (NO) sont équivalentes à celles obtenues en mode *Heading* (HE).

12.2.3 Niveau des configurations

12.2.3.1 Le coefficient de corrélation (r)

En NO, les r sont de 0,65 (± 0,34), alors qu'en HE, ils sont de 0,64 (± 0,26) (*cf.* figure 12.10).

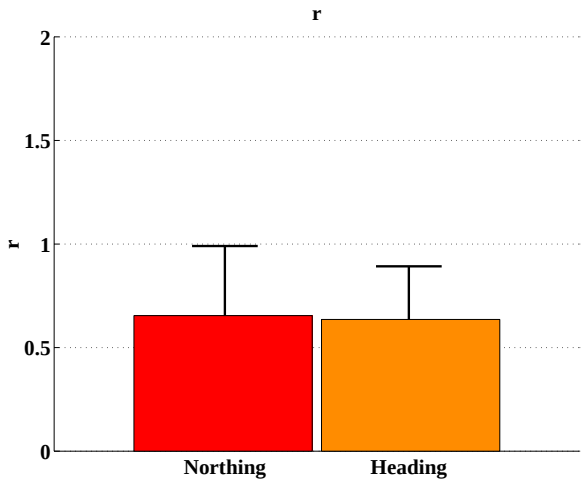


Figure 12.10 – Moyennes et Ecart-types du coefficient corrélation (r) en fonction des modes de navigation virtuelle.

Lors de l'analyse statistique, la comparaison des r en NO et HE révèle l'absence de différence significative (Z=0.15).

Les performances obtenues en NO et HE sont donc équivalentes.

12.2.3.2 La distorsion (DI)

En situation alignée, les DI sont de 63 (± 29) alors qu'ils sont de 70 (± 42) en situation non alignée (*cf.* figure 12.11).

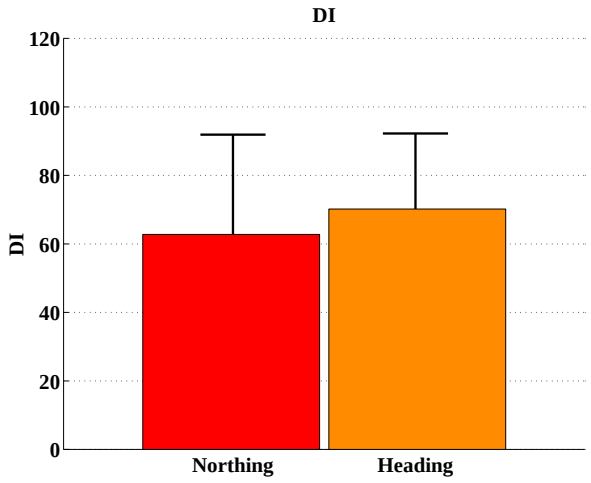


Figure 12.11 – Moyennes et Ecart-types de l'index de distorsion en fonction des modes de navigations virtuelle.

Il n'existe pas de différence significative (Z=0.76) entre les NO et HE.

De la même manière que pour la variable r, les performances obtenues en NO et HE sont donc équivalentes.

En résumé, au niveau des configurations, les analyses des variables montrent que les performances obtenues à la suite des navigations virtuelles en mode *Northing* (NO) sont équivalentes à celles obtenues en mode *Heading* (HE).

12.2.4 Synthèse sur les modes de navigation virtuelle

Niveaux	Directions	Localisations		Configurations	
Variables	Ea	Dte	Ate	r	DI
Différences à p<.05 selon **Wilcoxon**	**NO = HE (Z=0.07)**	**NO = HE (Z=0.30)**	**NO = HE (Z=0.41)**	**NO = HE (Z=0.15)**	**NO = HE (Z=0.76)**

Figure 12.12 – Synthèse des comparaisons des modes de navigation virtuelle aux niveaux des directions, des localisations et des configurations selon le test statistique de Wilcoxon à p<.05.

Finalement, tout alignement et tout sujet confondus, les analyses des variables des trois niveaux de représentation montrent que tous les résultats obtenus à la suite des navigations virtuelles en modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE) sont équivalents.

12.3 Les interactions entre les modes de navigation virtuelle et l'alignement

Si l'on considère les précédents résultats, aucune différence n'apparaît entre les modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE).

Cependant, si les performances obtenues en réponses aux questions non alignées se révélaient significativement meilleures à la suite des navigations en mode *Heading* (HE) qu'à la suite des navigations en mode *northing* (NO) alors l'hypothèse H3 serait vérifiée.

Nous procédons donc à l'analyse des performances des sujets en fonction des modes de navigation virtuelle et de l'alignement des questions.

12.3.1 Niveau des directions

En NO, les Ea sont de 15° (± 14) en situation alignée et de 21° (± 16) en situation non alignée. En HE, les Ea sont de 14° (± 12) en situation alignée et de 22° (± 15) en situation non alignée (*cf.* figure 12.13).

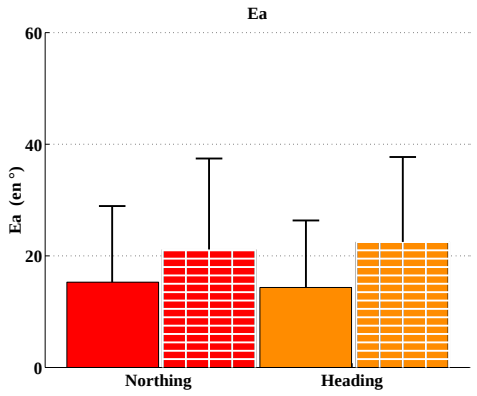


Figure 12.13 – Moyennes et Ecart-types des Ea en degrés en fonction des modes de navigation virtuelle et de l'alignement. Les barres pleines représentent les Ea alignées alors que les barres quadrillées correspondent aux Ea non alignées.

Aucune différence significative (Z=0.61) n'apparaît entre les réponses aux questions alignées en NO et en HE. Aucune différence significative (Z=0.62) n'apparaît non plus entre les réponses aux questions non alignées en NO et en HE (*cf.* figures 12.16 et 12.17).

En résumé, au niveau des directions, les performances obtenues à la suite de navigations virtuelles en mode *Heading* (HE) sont équivalentes à celles obtenues en mode *Northing* (NO) qu'il s'agisse de

répondre aux questions alignées ou non alignées.

12.3.2 Niveau des localisations

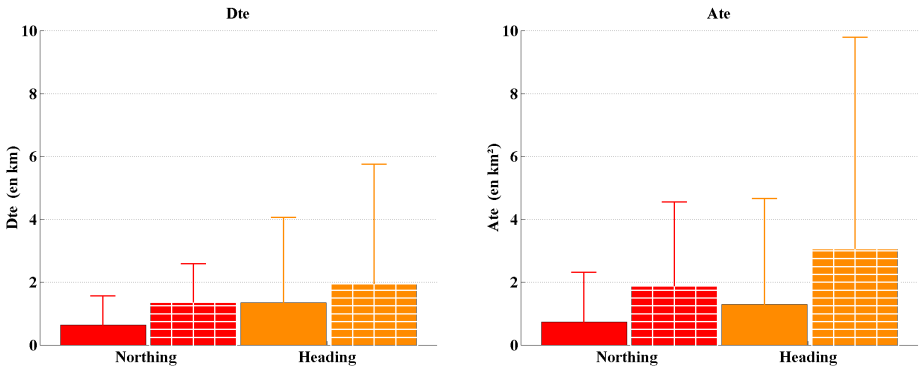


FIGURE 12.14 – Moyennes et Ecart-types des Dte et Ate en fonction des modes de navigation virtuelle et de l'alignement. Les barres pleines représentent les valeurs alignées alors que les barres quadrillées correspondent aux valeurs non alignées.

12.3.2.1 Les erreurs de distances (Dte)

En NO, les Dte sont de 0,6 km (± 0,9) en situation alignée et de 1,4 km (± 1,2) en situation non alignée. En HE, les Dte sont de 1,4 km (± 2,7) en situation alignée et de 2,0 km (± 3,8) en situation non alignée (*cf.* figure 12.14).

Aucune différence significative (Z=0.85) n'apparaît entre les réponses aux questions alignées en NO et en HE. Aucune différence significative (Z=0.24) n'apparaît non plus entre les réponses aux questions non alignées en NO et en HE (*cf.* figures 12.16 et 12.17).

12.3.2.2 Les triangles d'erreur (Ate)

En NO, les Ate sont de 0,7 km^2 (± 1,6) en situation alignée et de (1,9 km^2 ± 2,7) en situation non alignée. En HE, les Ate sont de 1,3 km^2 (± 2,7) en situation alignée et de 3,1 km^2 (± 6,7) en situation non alignée (*cf.* figure 12.14).

Aucune différence significative (Z=0.73) n'apparaît entre les réponses aux questions alignées en NO et en HE. Aucune différence significative (Z=0.03) n'apparaît non plus entre les réponses aux questions non alignées en NO et HE (*cf.* figures 12.16 et 12.17).

En résumé, au niveau des localisations, les performances obtenues à la suite de navigations virtuelles en mode *Heading* (HE) sont équivalentes à celles obtenues en mode *Northing* (NO) qu'il s'agisse

de répondre aux questions alignées ou non alignées.

12.3.3 Le niveau des configurations

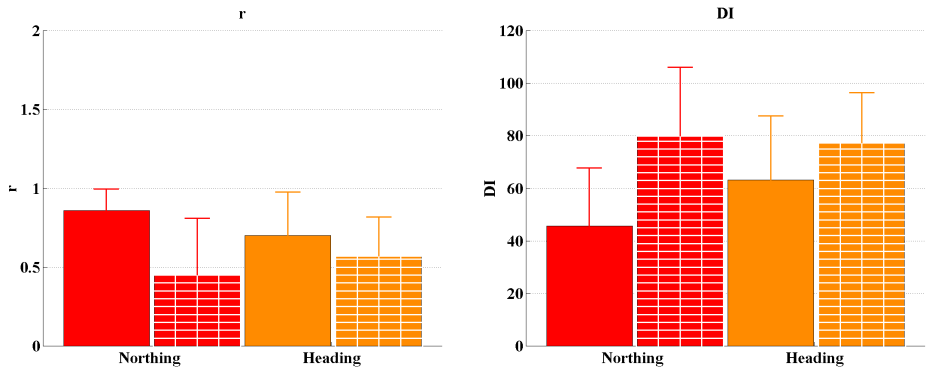


Figure 12.15 – Moyennes et Ecart-types des r et DI en fonction des modes de navigation virtuelle et de l'alignement. Les barres pleines représentent les valeurs alignées alors que les barres quadrillées correspondent aux valeurs non alignées.

12.3.3.1 Le coefficient de corrélation (r)

En NO, les r sont de 0,86 (± 0,13) en situation alignée et de (0,45 km^2 ± 0,36) en situation non alignée. En HE, les r sont de 0,70 (± 0,27) en situation alignée et de (0,57 km^2 ± 0,25) en situation non alignée (*cf.* figure 12.15).

Aucune différence significative (Z=1.21) n'apparaît entre les réponses aux questions alignées en NO et en HE. Aucune différence significative (Z=0.67) n'apparaît non plus entre les réponses aux questions non alignées en NO et HE (*cf.* figures 12.16 et 12.17).

12.3.3.2 La distorsion (DI)

En NO, les DI sont de 46 (± 22) en situation alignée et de 80 (± 26) en situation non alignée. En HE, les DI sont de 63 (± 24) en situation alignée et de 77 (± 19) en situation non alignée (*cf.* figure 12.15). Aucune différence significative (Z=0.94) n'apparaît entre les réponses aux questions alignées en NO et en HE. Aucune différence significative (Z=0.89) n'apparaît non plus entre les réponses aux questions non alignées en NO et HE (*cf.* figures 12.16 et 12.17).

En résumé, au niveau des configurations, les performances obtenues à la suite de navigations virtuelles en mode *Heading* (HE) sont équivalentes à celles obtenues en mode *Northing* (NO) qu'il s'agisse de répondre aux questions alignées ou non alignées.

12.3.4 Synthèse sur les interactions entre les modes de navigation virtuelle et l'alignement

12.3.4.1 Les modes de navigation en situation alignée

Questions Alignées					
Niveaux	Directions	Localisations		Configurations	
Variables	Ea	Dte	Ate	r	DI
Différences à p<.05 selon **Wilcoxon**	**NO = HE (Z=0.61)**	**NO = HE (Z=0.85)**	**NO = HE (Z=0.73)**	**NO = HE (Z=1.21)**	**NO = HE (Z=0.94)**

Figure 12.16 – Synthèse des comparaisons des modes de navigation virtuelle en fonction des réponses aux questions alignées aux niveaux des directions et des localisations selon le test statistique de Wilcoxon à p<.05.

Face aux questions alignées, aucun niveau de représentation ne révèle de différence entre les navigations virtuelles en mode *Northing* (NO) et en mode *Heading* (HE) (*cf.* figure 12.16).

12.3.4.2 Les modes de navigation en situation non alignée

Questions Non Alignées					
Niveaux	Directions	Localisations		Configurations	
Variables	Ea	Dte	Ate	r	DI
Différences à p<.05 selon **Wilcoxon**	**NO = HE (Z=0.62)**	**NO = HE (Z=0.24)**	**NO = HE (Z=0.03)**	**NO = HE (Z=0.67)**	**NO = HE (Z=0.89)**

Figure 12.17 – Synthèse des comparaisons des modes de navigation virtuelle en fonction des réponses aux questions non alignées aux niveaux des directions et des localisations selon le test statistique de Wilcoxon à p<.05.

Face aux questions non alignées, aucun niveau de représentation ne révèle de différence entre les navigations virtuelles en mode *Northing* (NO) et en mode *Heading* (HE) (*cf.* figure 12.17).

Finalement, à la suite des navigations virtuelles en modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE), aucune différence n'apparaît au sein des réponses aux questions alignées et non alignées. L'hypothèse 3 n'est donc pas vérifiée.

12.4 Les interactions entre les modes de navigation virtuelle et l'alignement en fonction des sujets

Si la navigation virtuelle en mode *Heading* (HE) n'améliore pas les réponses aux questions non alignées lorsque l'on considère les résultats de la totalité des sujets, l'hypothèse 3 ne peut être vérifiée. Cependant, l'analyse individuelle pourrait apporter de nouveaux éléments.

	Questions Alignées			Questions Non alignées		
Niveaux	Directions	Localisations		Directions	Localisations	
Variables	Ea	Dte	Ate	Ea	Dte	Ate
Sujet 1	NO = HE (Z=1.61)	NO < HE (Z=1.99)	NO < HE (Z=1.99)	NO = HE (Z=1.19)	NO = HE (Z=0.52)	NO = HE (Z=0.73)
Sujet 2	NO = HE (Z=0.57)	NO = HE (Z=0.52)	NO = HE (Z=1.78)	NO = HE (Z=0.68)	NO = HE (Z=0.52)	NO = HE (Z=0.31)
Sujet 3	NO = HE (Z=0.36)	NO = HE (Z=0.10)	NO = HE (Z=0.10)	NO = HE (Z=0.26)	NO = HE (Z=0.31)	NO = HE (Z=0.73)
Sujet 4	NO > HE (Z=2.29)	NO = HE (Z=0.10)	NO = HE (Z=0.52)	NO = HE (Z=0.83)	NO = HE (Z=0.75)	NO = HE (Z=0.31)
Sujet 5	NO = HE (Z=0.15)	NO = HE (Z=0.52)	NO = HE (Z=1.15)	NO = HE (Z=1.50)	NO = HE (Z=0.46)	NO = HE (Z=0.35)

Figure 12.18 – Tableau de synthèse des différences entre les modes de navigation virtuelle *Northing* (NO) et *Heading* (HE) en fonction de réponses aux questions alignées (à droite) et non alignées (à gauche).

Cette analyse des résultats issus des différentes conditions de navigations virtuelles par sujet n'utilise que les variables des niveaux des directions et des localisations car les variables r et DI du niveau des configurations ne sont pas assez nombreuses (deux par sujet) pour réaliser une comparaison statistique (*cf.* figure 12.18).

12.4.1 En situation alignée

12.4.1.1 Niveau des directions

Au niveau des directions, seul le sujet 4 obtient de meilleures réponses (Z=2.29) aux questions alignées en HE qu'en NO.

Aucune autre différence significative n'apparaît entre les performances obtenues en réponses aux questions alignées à la suite des navigations virtuelles en modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE) au niveau des directions.

12.4.1.2 Niveau des localisations

Au niveau des localisations, le sujet 1 présente de meilleures Dte (Z=1.99) et Ate (Z=1.99) en réponses aux questions alignées en NO qu'en HE (*cf.* figure 12.19).

Aucune autre différence significative n'apparaît entre les performances obtenues en réponses aux questions alignées à la suite des navigations virtuelles en modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE) au niveau des localisations.

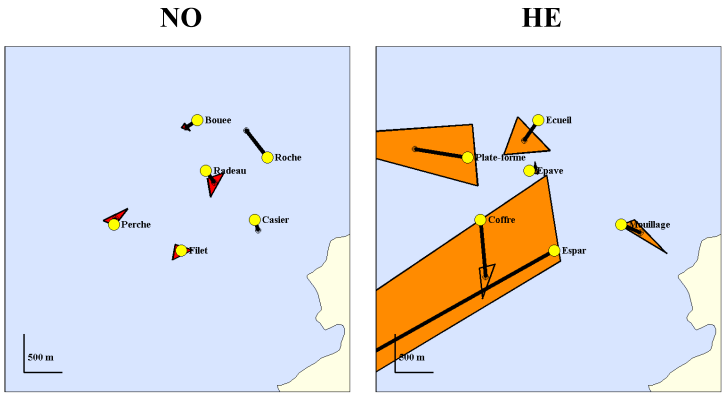


Figure 12.19 – Constructions issues de la convergence projective en réponses aux questions alignées après les navigations virtuelles en modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE) du sujet 1. Les disques jaunes cerclés de noir sont les positions justes des balises, les petites étoiles jaunes représentent les localisations cognitives. Les segments noirs épais correspondent aux erreurs de distances (Dte). Les aires des triangles correspondent aux aires des triangles d'erreur (Ate).

En résumé, en situation alignée, seul le sujet 4 obtient un résultat en faveur du mode *Heading* (HE) au niveau des directions. Ce résultat n'est pas confirmé aux niveau des localisations. A l'inverse, le sujet 1 obtient deux résultats en faveur du mode *Northing* (NO) au niveau des localisations mais ces résultats ne sont pas confirmés aux niveau des directions. Aucun autre sujet ne présente de différence relative à l'un ou l'autre des modes.

12.4.2 En situation non alignée

En situation non alignée, aucun sujet ne présente de différence significative entre les modes de navigation virtuelle *Northing* (NO) et *Heading* (HE).

12.4.3 Synthèse sur les interactions entre les modes de navigation virtuelle et l'alignement en fonction des sujets

Si les réponses aux questions alignées montrent que le sujet 1 présente de meilleurs résultats en mode *Heading* (HE) au niveau des localisations, à l'inverse le sujet 4 présente de meilleurs résultats en mode *Northing* (NO) au niveau des directions. Ces résultats vont à l'encontre de l'hypohtèse 3.

12.5 Conclusion sur les réponses aux questions de l'expérience de navigation

L'ensemble de ces résultats montre une absence de différence significative entre les réponses aux questions alignées à la suite des navigations virtuelles en modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE). Ils montrent également une absence de différence significative entre les réponses aux questions non-alignées à la suite des navigations virtuelles en modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE).

En effet, en situation non alignée, même la comparaison statistique sujet par sujet ne révèle strictement aucune différence significative entre les réponses aux questions faisant suite aux navigations virtuelles en mode *Heading* (HE) et celles à la suite des aux navigations virtuelles en mode *Northing* (NO)

Finalement, ce résultat ne permet pas la validation de l'hypothèse 3 selon laquelle **la navigation virtuelle avec SeaTouch en mode *Heading* (HE) permet aux marins non-voyants de coordonner les représentations s'inscrivant dans les référentiels spatiaux de types égo et allocentrés plus précisément qu'en mode *Northing* (NO)**.

Chapitre 13

Résultats en navigation réelle

Comme explicité au chapitre 11 (p.231), à la suite des navigations virtuelles en modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE), les sujets ont réalisé une navigation dans la Rade de Brest. Les questions situées que nous avons posées au cours de ces navigations en milieu naturel nous permettent d'évaluer la précision avec laquelle les sujets se repèrent par rapport aux balises de la configuration lorsqu'ils naviguent véritablement.

Nous cherchons ici à vérifier l'hypothèse selon laquelle **la préparation de navigation en mode *Heading* (HE) permet aux marins non-voyants de se situer plus précisément au cours de la navigation réelle que lorsqu'ils la préparent en mode *Northing* (NO) (hypothèse 4).** Nous analysons ici les réponses à des questions d'estimations des directions des différentes balises en cours de navigations en milieu naturel à la suite des préparations de navigations en modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE).

Nous procédons ici au traitement statistique des données issues des trois niveaux de représentation spatiale décrits dans la méthodologie générale (6.4 p.171). Nos échantillons de résultats ne respectant pas la loi normale, nous utilisons le test statistique non paramétrique de comparaison appariée de Wilocoxon. Nous adoptons un seuil de signification à $p<.05$.

13.1 Les modes de navigations virtuelles

13.1.1 Le niveau des directions

Les Ea issues des réponses aux questions situées sont de 23° (± 19) à la suite des préparations de navigation en mode *Northing* (NO) (*cf.* figure 13.1).

Les Ea issues des réponses aux questions situées sont de 19° (± 14) à la suite des préparations de

navigation en mode *Heading* (HE) (*cf.* figure 13.1).

L'analyse statistique ne révèle pas de différence significative (Z=1.40) entre les Ea obtenues en NO et HE (*cf.* tableau 13.4).

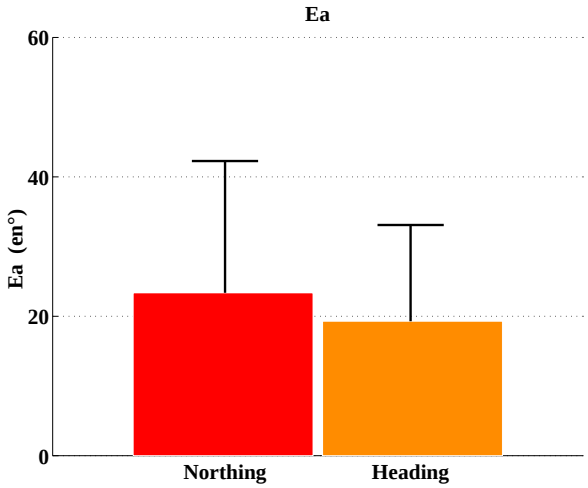


Figure 13.1 – Moyennes et Ecart-types des Ea (en degrés) issues des réponses aux questions situées en cours de navigation naturelle en fonction des modes de navigation virtuelle ayant été utilisés pour la préparation de l'itinéraire.

En résumé, au niveau des directions, l'analyse des erreurs angulaires (Ea) montre que les performances de repérage obtenues à la suite d'une préparation de navigation en mode *Northing* (NO) sont équivalentes à celles obtenues à la suite d'une préparation de navigation en mode *Heading* (HE).

13.1.2 Le niveau des localisations

13.1.2.1 Les erreurs de distance (Dte)

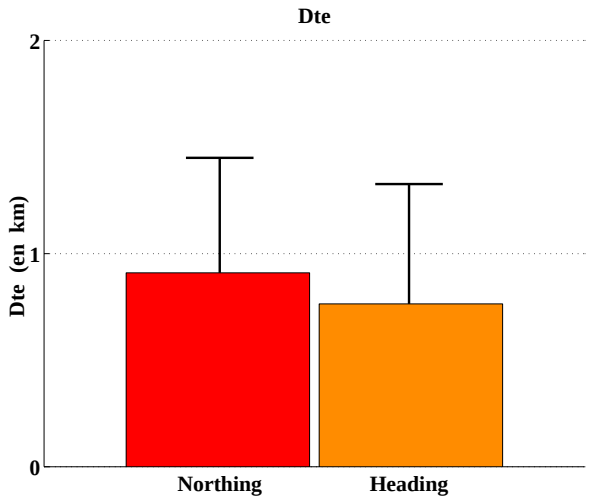


Figure 13.2 – Moyennes et Ecart-types des distances d'erreur (Dte) en km issues des réponses aux questions situées en cours de navigation naturelle en fonction des modes de navigation virtuelle ayant été utilisés pour la préparation de l'itinéraire.

Les Dte obtenues en réponses aux questions situées sont de 0,9 km (± 0,5) en NO (*cf.* figure 13.2).

Les Dte obtenues en réponses aux questions situées sont de 0,7 km (± 0,6) en HE (*cf.* figure 13.2).

L'analyse statistique ne révèle pas de différence significative (Z=0.71) entre les Dte obtenues en NO et en HE (*cf.* tableau 13.4).

13.1.2.2 Les triangles d'erreur (Ate)

Les Ate obtenues en réponses aux questions situées sont de 0.8 km^2 (± 0,9) en NO (*cf.* figure 13.3).

Les Ate obtenues en réponses aux questions situées sont de 0,4 km^2 (± 0,4) en HE (*cf.* figure 13.3).

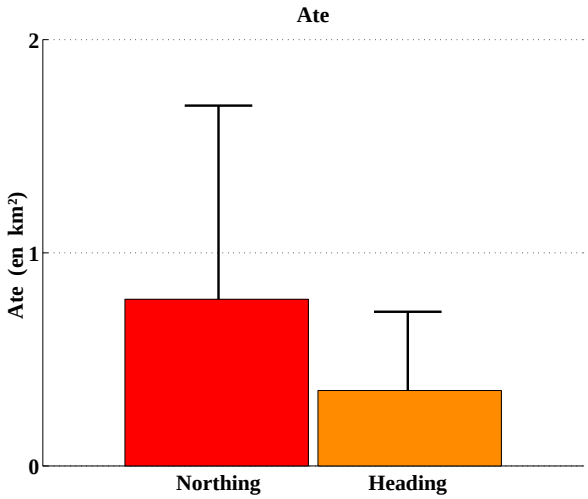


Figure 13.3 – Moyennes et Ecart-types des aires des triangles d'erreur (Ate) en km² issues des réponses aux questions situées en cours de navigation naturelle en fonction des modes de navigation virtuelle ayant été utilisés pour la préparation de l'itinéraire.

L'analyse statistique ne révèle pas de différence significative entre les Ate obtenues en NO et en HE (Z=1.65) (*cf.* tableau 13.4).

En résumé, au niveau des localisations, les analyses des erreurs de distances (Dte) et des aires des triangles d'erreur (Ate) montrent que les performances de repérage obtenues à la suite d'une préparation de navigation en mode *Northing* (NO) sont équivalentes à celles obtenues à la suite d'une préparation de navigation en mode *Heading* (HE).

13.1.3 Synthèse sur les modes de navigation virtuelle

Questions Situées			
Niveaux	Directions	Localisations	
Variables	Ea	Dte	Ate
Différences à p<.05 selon **Wilcoxon**	NO = HE (Z=0.61)	NO = HE (Z=0.85)	NO = HE (Z=0.73)

Figure 13.4 – Synthèse des comparaisons des réponses aux questions situées à la suite des préparations de navigation en mode *Northing* (NO) et *Heading* (HE) aux niveaux des directions et des localisations selon le test statistique de Wilcoxon à p<.05.

Finalement, aucun de ces deux niveaux de représentation ne montre de différence entre les performances spatiales obtenues en cours de navigation naturelle à la suite des préparations de navigation avec SeaTouch en mode *Northing* (NO) ou *Heading* (HE) (*cf.* tableau 13.4).

13.2 Les modes de navigation virtuelle en fonction des sujets

13.2.1 Le niveau des directions

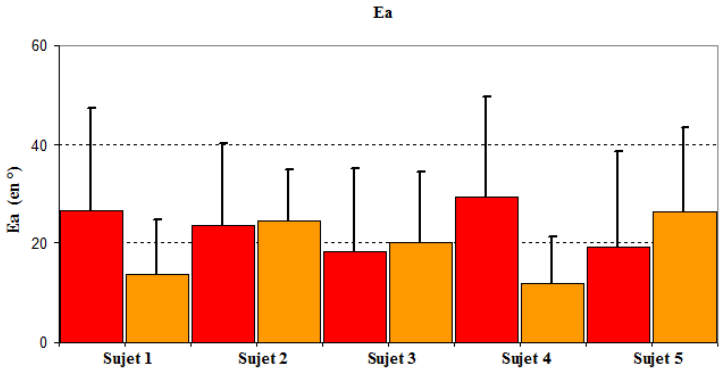


Figure 13.5 – Moyennes et Ecart-types des erreurs angulaires (Ea en degrés) issues des réponses aux questions situées en cours de navigation naturelle en fonction des modes de navigation virtuelle ayant été utilisés pour la préparation de l'itinéraire pour chaque sujet. Conformément à la nomenclature de couleur précédente, le orange (couleur plus claire) correspond au mode *Northing* (NO) alors que le rouge (couleur plus foncée) correspond au mode *Heading* (HE).

Le sujet 1 présente une Ea moyenne de 26 ° (±21) en NO et 14 ° (±11) en HE.

Le sujet 2 présente une Ea moyenne de 24 ° (±17) en NO et 25 ° (±11) en HE.

Le sujet 3 présente une Ea moyenne de 18 ° (±17) en NO et 20 ° (±15) en HE.

Le sujet 4 présente une Ea moyenne de 29 ° (±20) en NO et 12 ° (±10) en HE.

Le sujet 5 présente une Ea moyenne de 19 ° (±20) en NO et 26 ° (±17) en HE (*cf.* figure 13.5).

L'analyse statistique révèle que les sujets 1 et 4 présentent des erreurs angulaires (Ea) significativement moins importantes (respectivement Z=2.27 et Z=2.27) en réponses aux questions situées à la suite des préparations de navigations en mode *Heading* (HE) qu'à la suite des préparations de navigations en mode *Northing* (NO) (*cf.* tableau).

13.2.2 Le niveau des localisations

13.2.2.1 Les erreurs de distances (Dte)

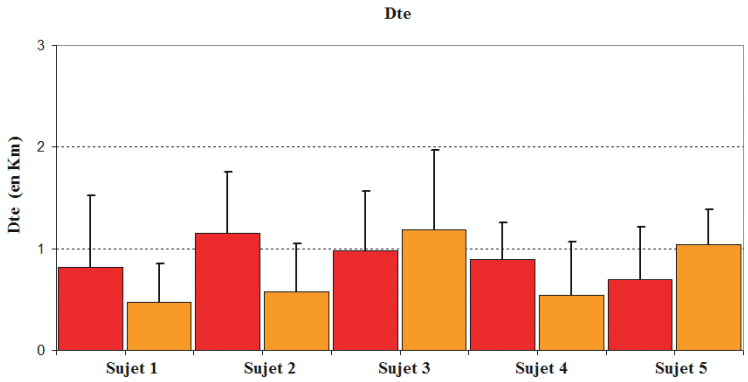


Figure 13.6 – Moyennes et Ecart-types des distances d'erreur (Dte) en km issues des réponses aux questions situées en cours de navigation naturelle en fonction des modes de navigation virtuelle ayant été utilisés pour la préparation de l'itinéraire pour chaque sujet. Conformément à la nomenclature de couleur précédente, le orange (couleur plus claire) correspond au mode *Northing* (NO) alors que le rouge (couleur plus foncée) correspond au mode *Heading* (HE).

Le sujet 1 présente une Dte moyenne de 0,8 km (±0,7) en NO et 0,5 km (±0,4) en HE.

Le sujet 2 présente une Dte moyenne de 1,1 km (±0,6) en NO et 0,6 km (±0,5) en HE.

Le sujet 3 présente une Dte moyenne de 1,0 km (±0,6) en NO et 1,2 km (±0,8) en HE.

Le sujet 4 présente une Dte moyenne de 0,9 km (±0,4) en NO et 0,5 km (±0,5) en HE.

Le sujet 5 présente une Dte moyenne de 0,7 km (±0,5) en NO et 1,0 km (±0,3) en HE (*cf.* figure 13.6).

L'analyse statistique révèle que le sujet 2 présente des erreurs de distances des localisations cognitives (Dte) significativement moins importantes (Z=2.02) en réponses aux questions situées à la suite des préparations de navigations en mode *Heading* (HE) qu'à la suite des préparations de navigations en mode *Northing* (NO) (*cf.* tableau).

A l'inverse, le sujet 5 présente des erreurs significativement moins importantes (Z=2.02) à la suite des préparations de navigations en mode *Northing* (NO).

13.2.2.2 Les aires des triangles d'erreurs (Ate)

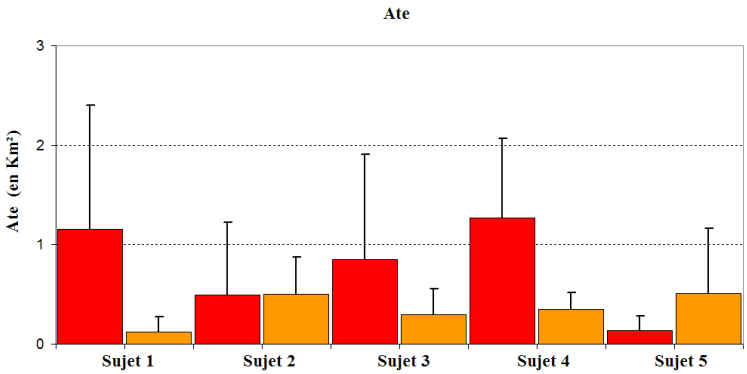


FIGURE 13.7 – Moyennes et Ecart-types des aires des triangles d'erreur (Ate) en km^2 issues des réponses aux questions situées en cours de navigation naturelle en fonction des modes de navigation virtuelle ayant été utilisés pour la préparation de l'itinéraire pour chaque sujet. Conformément à la nomenclature de couleur précédente, le orange (couleur plus claire) correspond au mode *Northing* (NO) alors que le rouge (couleur plus foncée) correspond au mode *Heading* (HE)

Le sujet 1 présente une Ate moyenne de 1,2 km^2 (±1,2) en NO et 0,1 km^2 (±0,2) en HE.

Le sujet 2 présente une Ate moyenne de 0,5 km^2 (±0,7) en NO et 0,5 km^2 (±0,4) en HE.

Le sujet 3 présente une Ate moyenne de 0,8 km^2 (±1,1) en NO et 0,3 km^2 (±0,3) en HE.

Le sujet 4 présente une Ate moyenne de 1,3 km^2 (±0,8) en NO et 0,3 km^2 (±0,2) en HE.

Le sujet 5 présente une Ate moyenne de 0,1 km^2 (±0,1) en NO et 1,5 km^2 (±0,7) en HE (*cf.* figure 13.7).

L'analyse statistique révèle que le sujet 1 présente des aires de triangles d'erreur (Ate) significativement moins importantes (Z=2.02) en réponses aux questions situées à la suite des préparations de navigations en mode *Heading* (HE) qu'à la suite des préparations de navigations en mode *Northing* (NO) (*cf.* tableau).

13.2.3 Synthèse sur les modes de navigation virtuelle en fonction des sujets

Niveaux	Directions	Localisations	
Variables	Ea	Dte	Ate
Sujet 1	NO > HE (Z=2.27)	NO = HE (Z=0.40)	NO > HE (Z=2.02)
Sujet 2	NO = HE (Z=0.82)	NO > HE (Z=2.02)	NO = HE (Z=0.40)
Sujet 3	NO = HE (Z=0.82)	NO = HE (Z=0.67)	NO = HE (Z=0.40)
Sujet 4	NO > HE (Z=2.27)	NO = HE (Z=1.48)	NO = HE (Z=1.75)
Sujet 5	NO = HE (Z=0.30)	NO < HE (Z=2.02)	NO = HE (Z=0.50)

Figure 13.8 – Synthèse de l'analyse statistique des Ea, Dte et Ate au cours des navigations naturelles à la suite des préparations d'itinéraire en mode *Heading* (HE) et *Northing* (NO).

Finalement, les sujets 1, 2 et 4 présentent chacun une amélioration significative sur une des trois variables analysées à la suite d'une préparation de navigation en mode *Heading* (HE). Les résultats du sujet 3 ne montrent aucune différence significative entre les deux modes de préparation des navigation. A l'inverse le sujet 5 présente une amélioration sur une variable à la suite de la préparation de navigation en mode *Northing* (*cf.* tableau).

13.3 Conclusion sur les réponses aux questions situées

D'une façon générale il n'existe pas différence significative entre les réponses aux questions situées faisant suite aux entraînements de navigation virtuelle en modes *Heading* (HE) et *Northing* (NO). Ces résultats ne vérifient pas l'hypothèse 4 selon laquelle **la préparation de navigation en mode *Heading* (HE) permet aux marins non-voyants de se situer plus précisément au cours de la navigation réelle que lorsqu'ils la préparent en mode *Northing* (NO)**.

Cependant quelques différences individuelles apparaissent. Une analyse individuelle de l'activité des sujets en situation virtuelle et en situation réelle est susceptible d'apporter des éléments de discussion.

Chapitre 14

Explorations et navigations

L'analyse statistique individuelle des réponses aux questions non alignées n'a révélé strictement aucune différence significative entre les réponses aux questions non alignées faisant suite aux navigations virtuelles en conditions *Northing* (NO) et *Heading* (HE). Ainsi, l'hypothèse selon laquelle la multiplicité des points de vue haptiques permet l'amélioration de la coordination des représentations s'inscrivant dans les référentiels spatiaux ne se vérifie pas (hypothèse 3).

Par ailleurs, l'analyse statistique individuelle des réponses aux questions situées n'a révélé que peu de différences significatives entre les précisions des repérages en milieu réel faisant suite aux navigations virtuelles en conditions *Northing* (NO) et *Heading* (HE). Cependant certains résultats individuels présentent des différences significatives témoignant d'un possible apport de la navigation virtuelle en mode *Heading* (HE) pour améliorer le repérage au cours des navigations réelles (hypothèse 4).

Dans ce chapitre, nous cherchons des éléments de compréhension sur les conditions favorisant le transfert d'apprentissage depuis le repérage dans le virtuel vers le repérage dans le réel. Nous présentons plus particulièrement les *patterns* d'exploration haptique associés aux trajectoires du voilier au cours des navigations virtuelles en modes *Heading* (HE) et *Northing* (NO). Nous nous intéressons également aux figures obtenues à partir des questions situées au cours des évolutions des trajectoires du voilier lors des navigations réelles.

14.1 Analyse individuelle

Au cours des navigations virtuelles, nous avons enregistré les trajets manuels des sujets et les trajectoires virtuelles du voilier sur les cartes de SeaTouch. Au cours des navigations naturelles, nous avons enregistré les traces du voilier réel et les positions où les sujets se sont repérés. Rappelons que les trajectoires évoluent dans le sens de aiguilles d'une montre en condition *Northing* (NO) et

dans le sens inverse en condition *Heading* (HE). Le vent vient du nord moyennant des variations d'une vingtaine de degrés lors des navigations réelles (*cf.* tableaux 14.1 ; 14.2 ; 14.3 ; 14.4 ; 14.5). Afin de contrebalancer les effets d'ordre dus à la tâche en elle-même, les sujets 1, 3 et 5 ont commencé par la condition *Northing* (NO) alors que les sujets 2 et 4 ont commencé la condition *Heading* (HE).

14.1.1 Le sujet 1

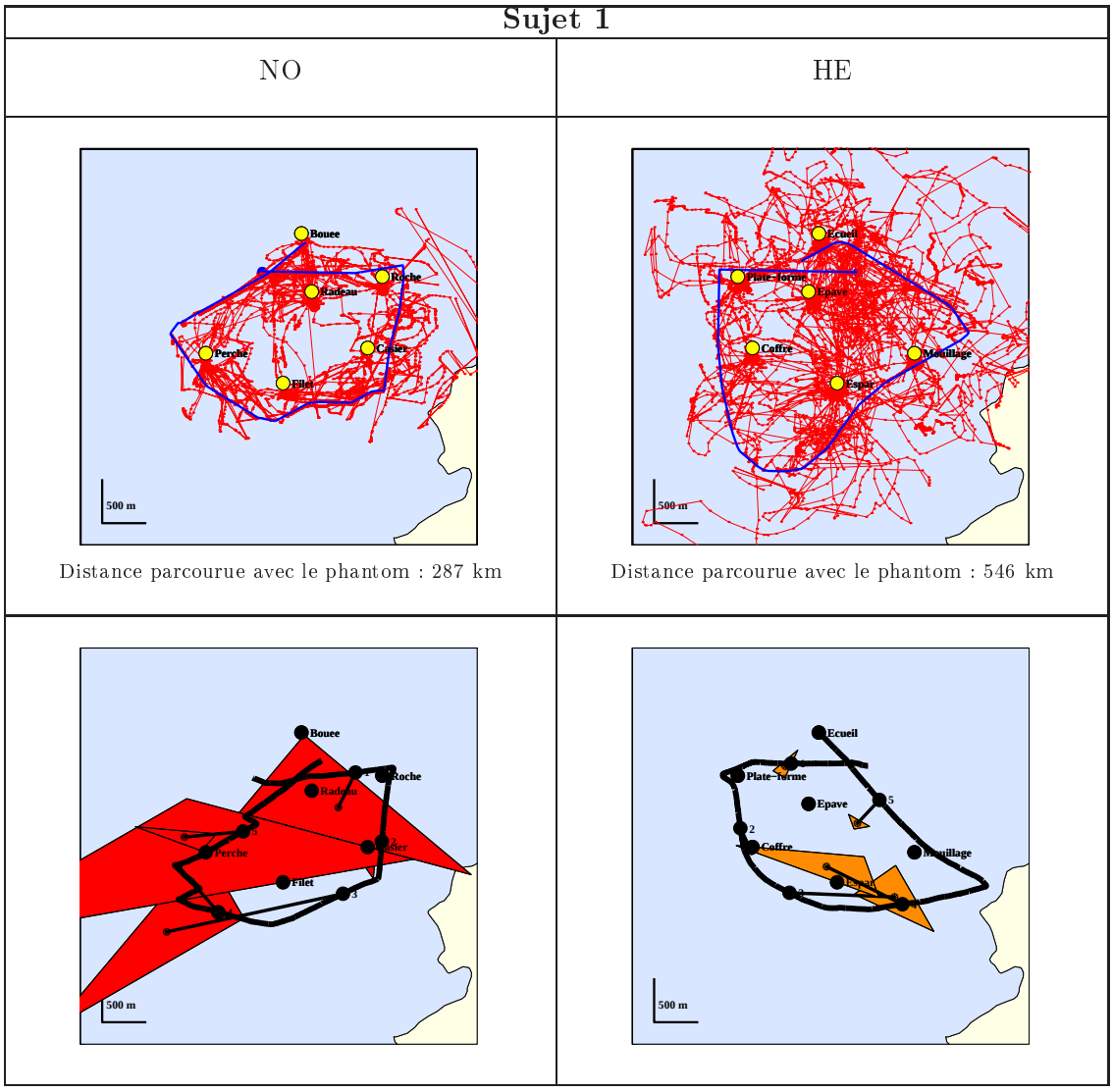


Tableau 14.1 – Les modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE) du sujet 1. En haut, les *patterns* d'exploration haptiques et les trajectoires des navigations virtuelles. En bas, les réponses aux questions situées et les trajectoires des navigations réelles. Les distances parcourues avec le Phantom sont calculées à l'échelle de la carte.

En NO, les mouvements du sujet 1 sont principalement des allers et retours entre la prochaine balise de la route et le voilier virtuel (*cf.* figure 14.1). La trajectoire de ce voilier virtuel s'écarte d'ailleurs très peu de la route préparée (*cf.* tableau 14.1).

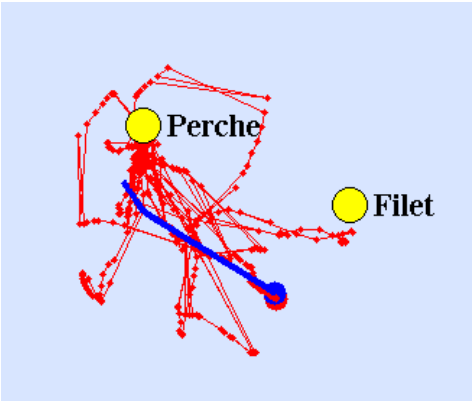


Figure 14.1 – Exemple de mouvements exploratoires d'allers et retours entre le voilier virtuel et la prochaine balise du sujet 1 sur un segment de navigation virtuelle en mode *Northing* (NO). Le point bleu désigne le début de la séquence du segment présenté.

En HE, le sujet 1 parcourt l'espace de travail d'une manière beaucoup plus globale. En outre, certains mouvements hors de la configuration semblent témoigner de la recherche de balise en dehors de la configuration (*cf.* tableau 14.1). La trajectoire du voilier virtuel s'écarte assez significativement de la route préparée entre le « Coffre » et l'« Espar ». Pour rejoindre le parcours, le sujet 1 recherche principalement la prochaine balise : l'« Espar » (*cf.* figure 14.2).

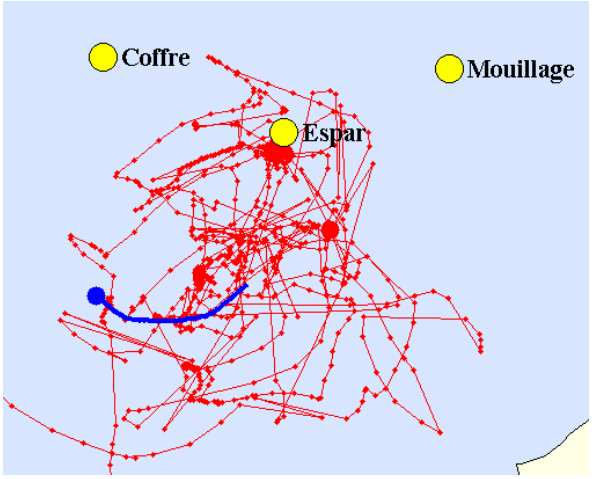


Figure 14.2 – Exemple de mouvements de recherche de l'« Espar » du sujet 1 après un écart par rapport à l'itinéraire préparé en mode *Heading* (HE).

Les trajectoires des navigations réelles montrent que les itinéraires sont réussis dans les deux

conditions malgré une direction du vent plutôt nord-nord-ouest en NO et nord-nord-est en HE. Nous notons que le repérage est plus précis en HE au niveau des directions.

14.1.2 Le sujet 2

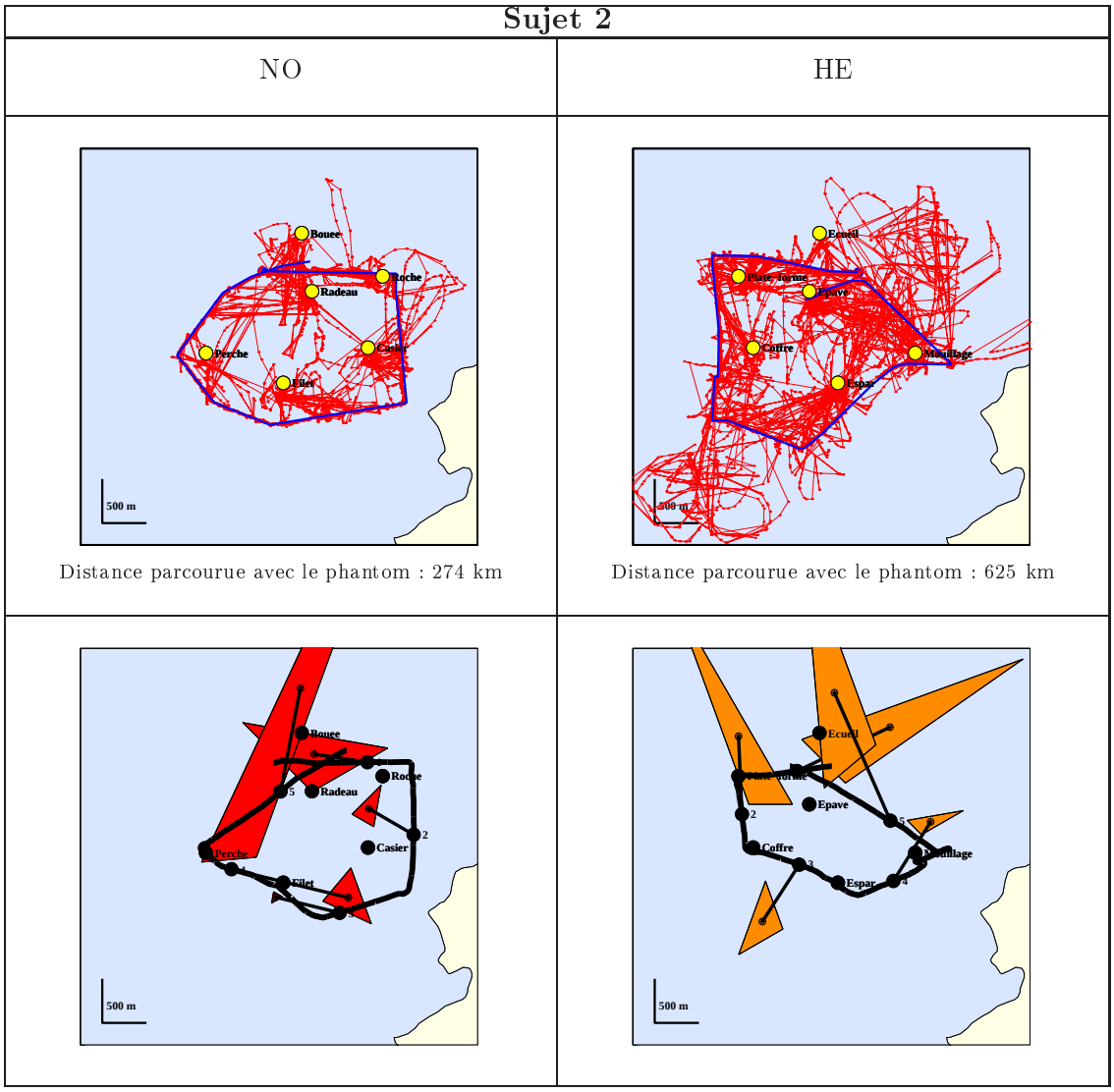


Tableau 14.2 – Les modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE) du sujet 2. En haut, les *patterns* d'exploration haptiques et les trajectoires des navigations virtuelles. En bas, les réponses aux questions situées et les trajectoires des navigations réelles. Les distances parcourues avec le Phantom sont calculées à l'échelle de la carte.

De la même manière que pour le sujet 1, en NO, les mouvements du sujet 2 sont principalement des allers et retours entre la prochaine balise de la route et le voilier virtuel (*cf.* figure 14.3). La trajectoire du voilier virtuel s'écarte également assez peu de la route préparée en NO. Nous remarquons cependant

que le second changement de cap, après le passage du « Casier », est relativement tardif (*cf.* tableau 14.2 et figure 14.3).

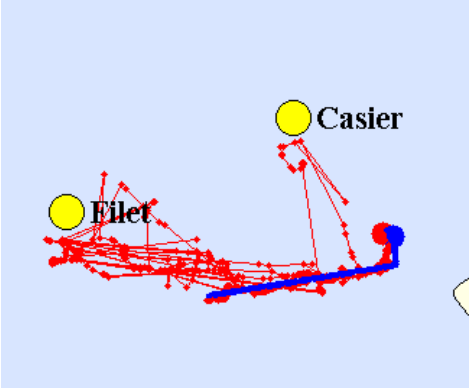


Figure 14.3 – Exemple de mouvements exploratoires d'allers et retours entre le voilier virtuel et les balises initiale et finale du sujet 2 sur un segment de navigation virtuelle en mode *Northing* (NO). Le point bleu désigne le début de la séquence du segment présenté.

En HE, le sujet 2 se concentre toujours sur les balises les plus proches. Cependant, lorsque la trajectoire du voilier virtuel s'écarte de la route préparée après le « Coffre », il semble chercher l'« Espar » et l'« Ecueil » dans une direction inappropriée avant d'identifier l'« Espar » et d'ajuster son cap (*cf.* figure 14.4).

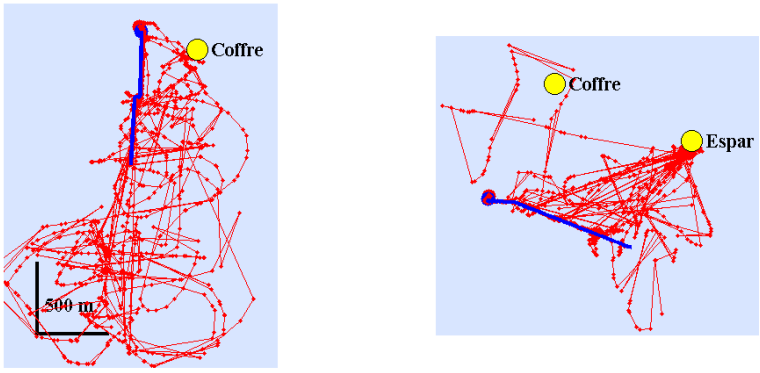


Figure 14.4 – Exemple de mouvements de recherche de l'« Espar » du sujet 2 après un écart par rapport à l'itinéraire préparé en mode *Heading* (HE).

Outre un virement prématuré lors du passage du Mouillage en HE, les trajectoires des navigations réelles montrent que les itinéraires sont réussis dans les deux conditions. Nous remarquons que le virement tardif après le « Casier » au cours de la navigation virtuelle en NO est reproduit au cours de la navigation en situation naturelle. A l'inverse, l'écartement par rapport à la route après le passage

du « Coffre » en HE n'est pas réitéré en milieu naturel. Par ailleurs, l'analyse statistique révèle un meilleur repérage en HE au niveau des localisations (Dte seulement).

14.1.3 Le sujet 3

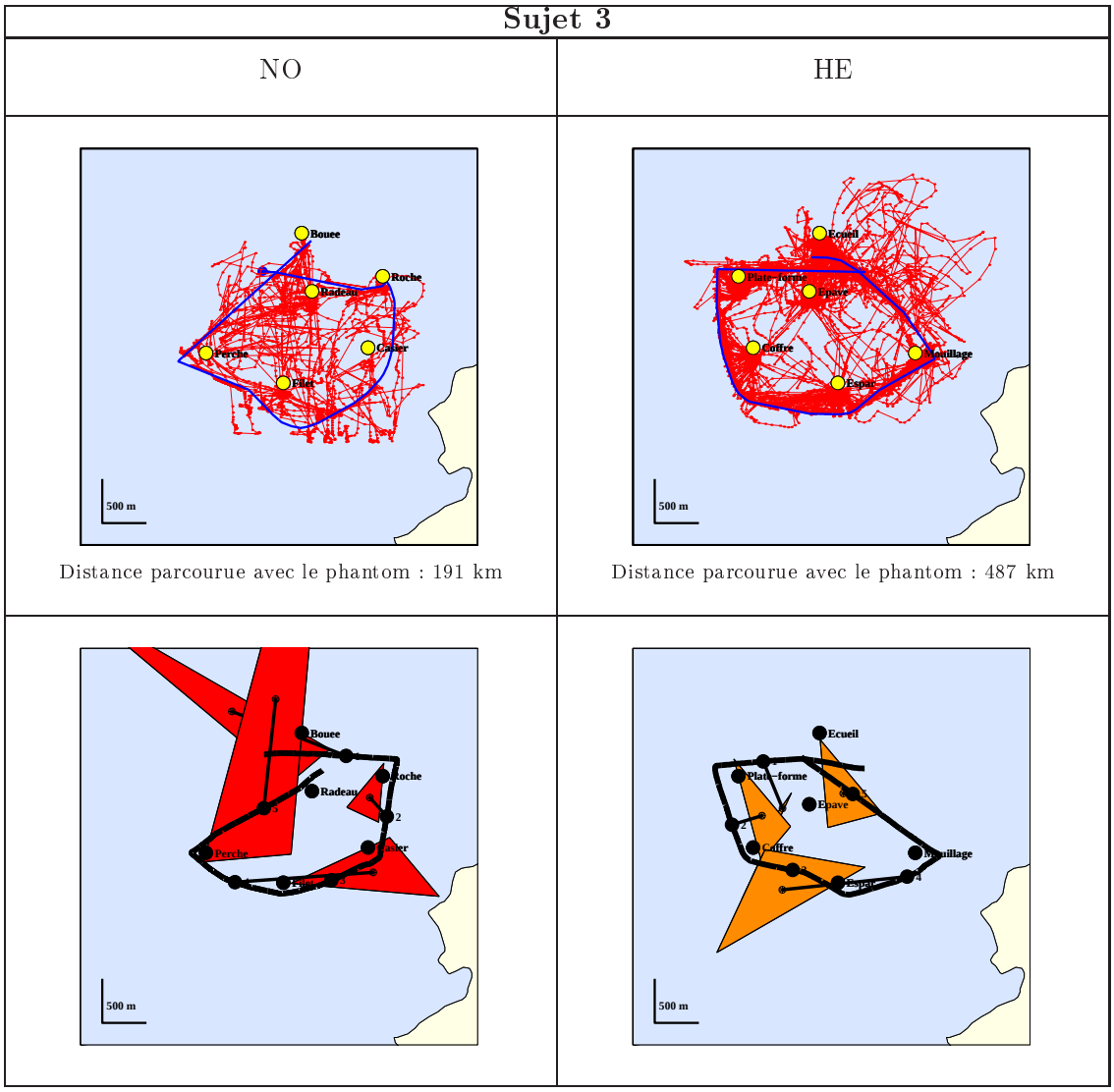


Tableau 14.3 – Les modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE) du sujet 3. En haut, les *patterns* d'exploration haptiques et les trajectoires des navigations virtuelles. En bas, les réponses aux questions situées et les trajectoires des navigations réelles. Les distances parcourues avec le Phantom sont calculées à l'échelle de la carte.

En NO, au début du parcours les explorations haptiques sont presque inexistantes. Le cap adopté dirige le voilier du mauvais côté de la balise mais le sujet 3 n'en fait le constat que très tardivement. Il tente alors de modifier sa direction et se retrouve « face au vent ». Cette situation critique amène

finalement le voilier virtuel sur la « Roche » où il s'échoue (*cf.* figure 14.5).

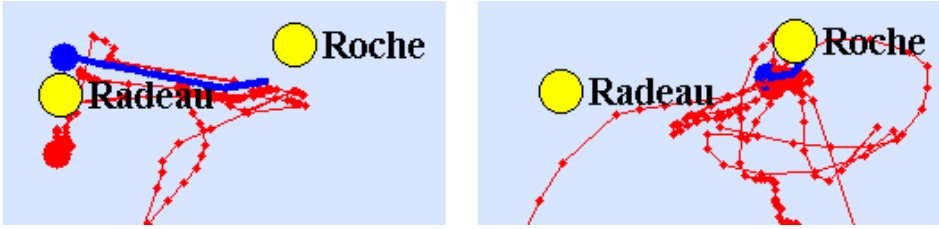


Figure 14.5 – Naufrage virtuel du sujet 3 en mode *Northing* (NO). Après un moment où les explorations sont quasiment absentes (image de gauche), le sujet 3 s'échoue sur la « Roche » (image de droite)

Le sujet 3 respecte ensuite strictement l'itinéraire qu'il a préparé tout en s'imposant une importante distance entre avec les balises lors de leur contournement (*cf.* tableau 14.3). Il utilise par ailleurs le même type d'exploration que les autres sujets en se souciant plus particulièrement de la prochaine balise (*cf.* figure 14.6).

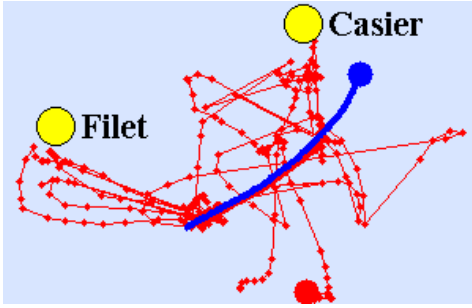


Figure 14.6 – Exemple de mouvements exploratoires d'aller et retour entre le voilier virtuel et les balises initiale et finale sur un segment de navigation virtuelle en mode *Northing* (NO) du sujet 3.

En HE, le sujet 3 concentre ses explorations sur les balises les plus proches (*cf.* figure 14.7). Il suit strictement la route préparée. Néanmoins après le virement au niveau du « Mouillage », une brève recherche haptique de l'« Ecueil » se révèle peu précise (*cf.* tableau 14.3).

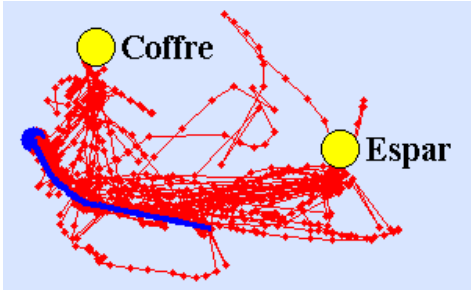


Figure 14.7 – Exemple de mouvements de recherche de la balise la plus proche en mode *Heading* (HE).

Les trajectoires réelles sont particulièrement précises et aucune différence significative n'apparaît au sein des repérages.

14.1.4 Le sujet 4

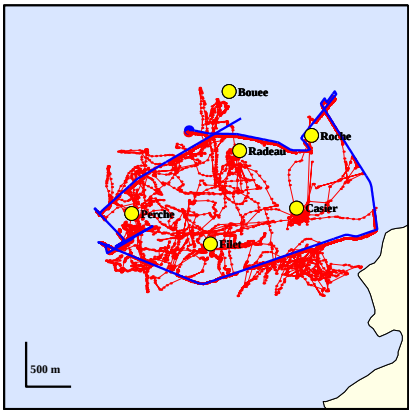
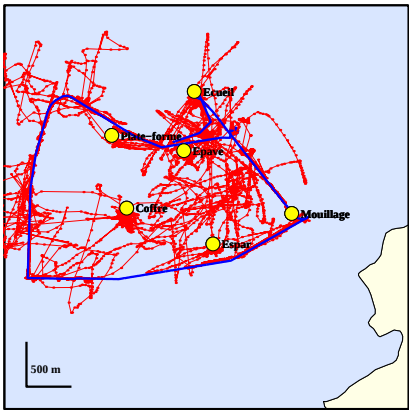
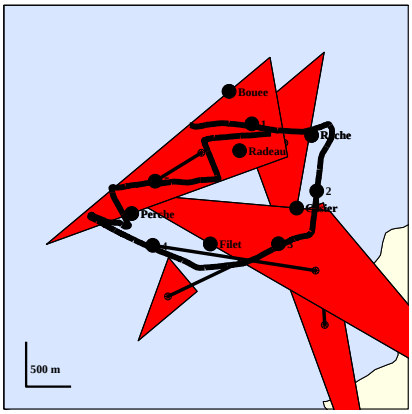
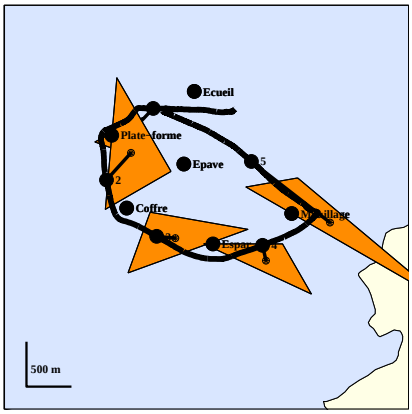
Sujet 4	
NO	HE
 Distance parcourue avec le phantom : 147 km	 Distance parcourue avec le phantom : 216 km
	

Tableau 14.4 – Les modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE). En haut, les *patterns* d'exploration haptiques et les trajectoires des navigations virtuelles. En bas, les réponses aux questions situées et les trajectoires des navigations réelles. Les distances parcourues avec le Phantom sont calculées à l'échelle de la carte.

En NO et en HE, le sujet 4 connaît des périodes où il positionne le Phantom sur le voilier virtuel et se concentre sur les informations vocales de l'azimut de la balise la plus proche. Ces séquences de navigation « à bord » du voilier virtuel se révèlent être au détriment de l 'exploration du reste de la

configuration (*cf.* figure 14.8).

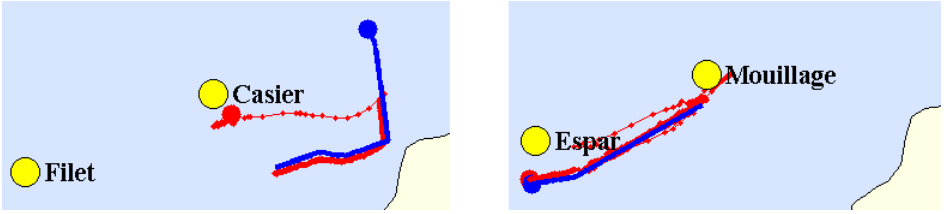


Figure 14.8 – Séquence où le sujet 4 explore peu l'environnement et conserve le Phantom à bord du voilier virtuel en mode *Northing* (NO) (image de gauche) et en mode *Heading* (HE) (image de droite).

En NO uniquement, le sujet 4 rencontre des difficultés lors des passages de la « Roche » et de la « Perche ». Les trajectoires témoignent de difficultés à contourner les balises en fonction de l'orientation du vent. Le voilier virtuel se trouve par moment « face au vent » mais s'écarte relativement peu de l'itinéraire qui a été préparé en mode *Northing* (NO) (*cf.* figure 14.9).

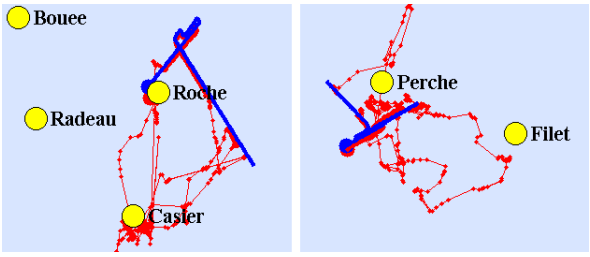


Figure 14.9 – Séquences où le sujet 4 en mode *Northing* (NO) rencontre des difficultés à contourner la balise à cause de l'orientation du vent.

En HE, le voilier virtuel quitte la route après la « Plate forme » pour la retrouver après le « Coffre ». Malgré la distance, le sujet va au contact des balises les plus proches pour retrouver sa route (*cf.* figure 14.10).

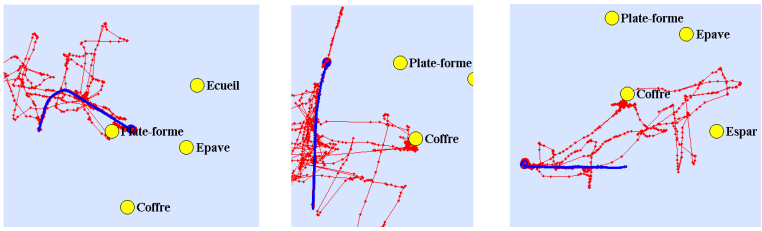


Figure 14.10 – Séquences chronologiques où le sujet 4 s'écarte de son itinéraire (image de gauche) trouve la balise la plus proche (image centrale) et retrouve son itinéraire (image de droite) .

Les trajectoires de navigations réelles en NO montrent que le sujet 4 rencontre à nouveau des difficultés en fin de parcours lors du passage de la « Perche ». De plus, l'orientation nord-nord-est

du vent l'a obligé à louvoyer (zig-zaguer) pour passer la ligne d'arrivée. En HE, la route est suivie strictement. Finalement la précision du repérage est significativement meilleure en HE.

14.1.5 Le sujet 5

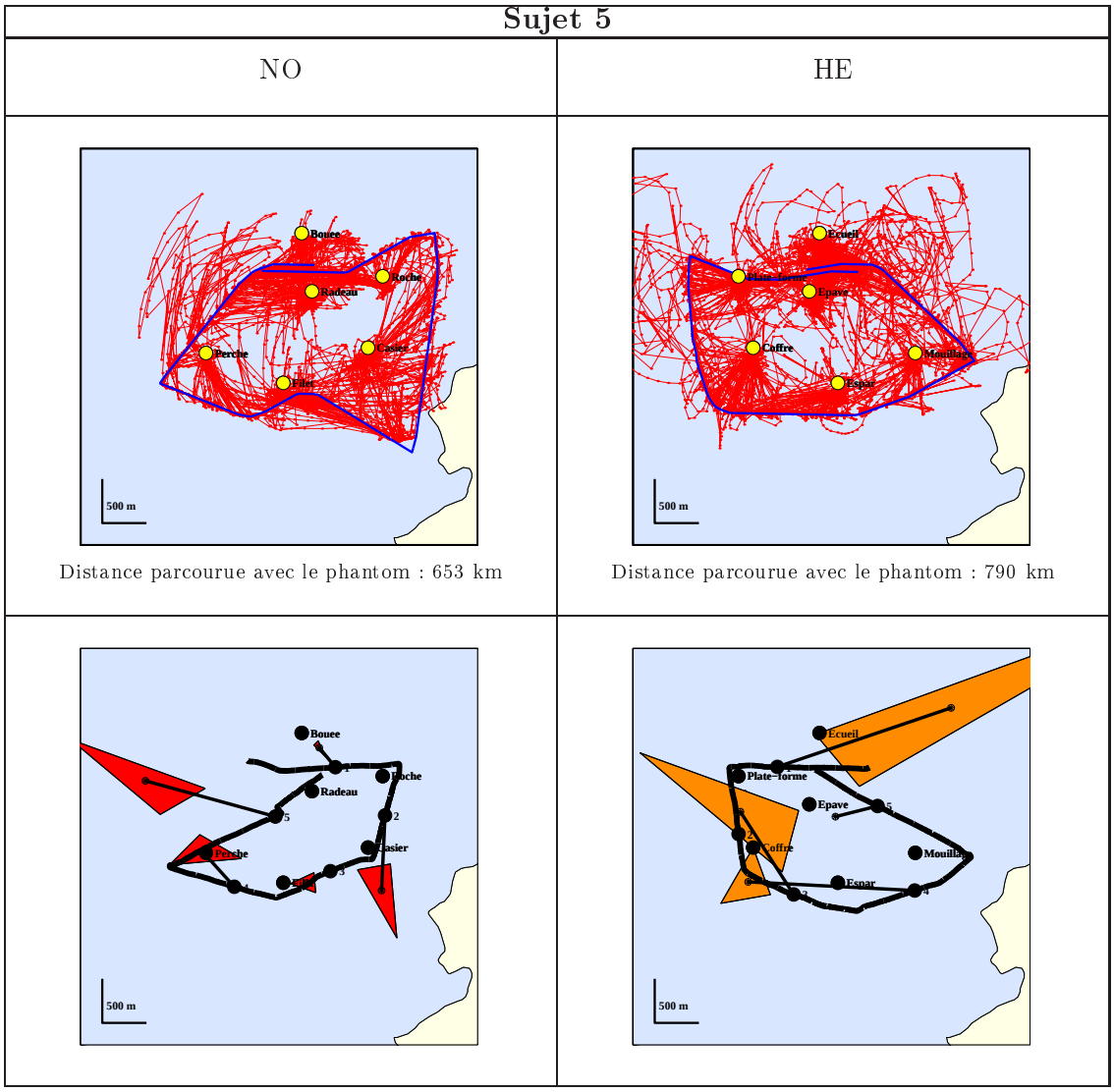


Tableau 14.5 – Les modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE). En haut, les *patterns* d'exploration haptiques et les trajectoires des navigations virtuelles. En bas, les réponses aux questions situées et les trajectoires des navigations réelles. Les distances parcourues avec le Phantom sont calculées à l'échelle de la carte.

En NO et HE, les mouvements d'exploration sont particulièrement importants et présentent des *patterns* assez semblables (*cf.* tableau 14.5). Ainsi, le sujet 5 explore principalement la prochaine balise de l'itinéraire en cours de réalisation qu'il s'agisse des navigations virtuelles en mode Northing (NO)

ou *Heading* (HE) (*cf.* figure 14.11).

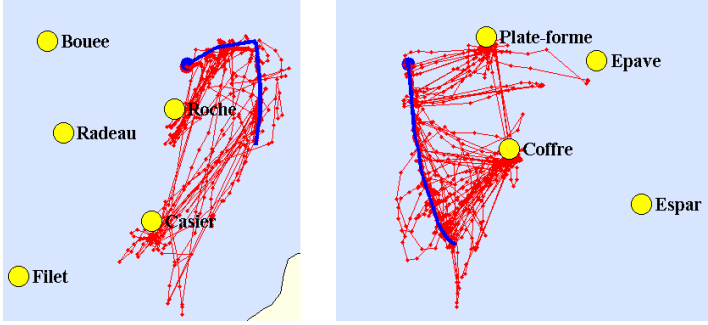


Figure 14.11 – Séquences où le sujet 5 explore les balises de son itinéraire en mode *Northing* (NO) comme en mode *Heading* (HE) (image de droite).

En NO, lorsque le sujet 5 s'écarte de la route en tardant à modifier son cap après le passage du « Casier » (*cf.* figure 14.12). Il retrouve ensuite son itinéraire en explorant les balises initiale et finale du segment de route en cours. Aucun mouvement hors configuration n'apparait.

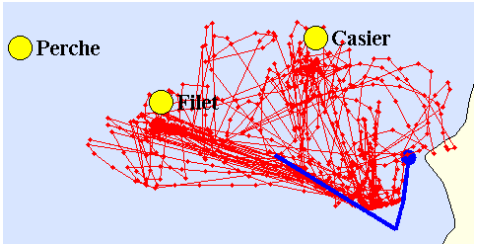


Figure 14.12 – Séquences où le sujet 5 s'écarte de la route en mode *Northing* (NO).

En HE, quelques mouvements hors de la configuration sont réalisés après le passage de la « Plate-forme » (*cf.* figure 14.13).

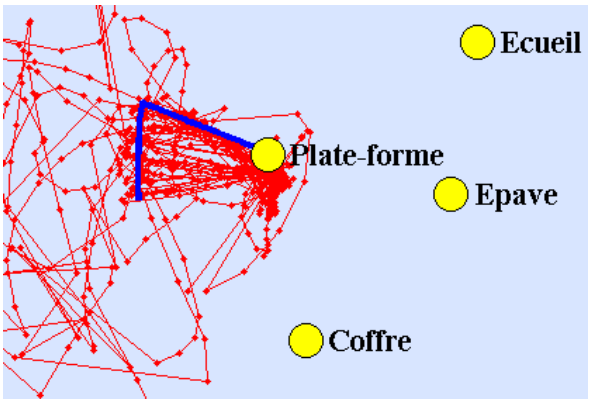


Figure 14.13 – Séquence où le sujet 5 réalise quelques mouvements hors configuration en mode *Heading* (HE).

Notons qu'il s'agit du seul sujet présentant des écarts à la route dans les deux conditions.

Les trajectoires des navigations réelles montrent que les itinéraires des deux conditions sont tout à fait réussis. Aucune différence n'apparaît dans les résultats du repérage en réponses aux questions situées.

14.2 Analyse générale

14.2.1 Les distances parcourues avec le phantom

D'une manière générale, les activités exploratoires exercées en mode *Heading* (HE) sont plus importantes que celles exercées en mode *Northing* (NO). En effet, tous les sujets parcourent plus de distance plus importante dans ce second mode (*cf.* figure 14.14).

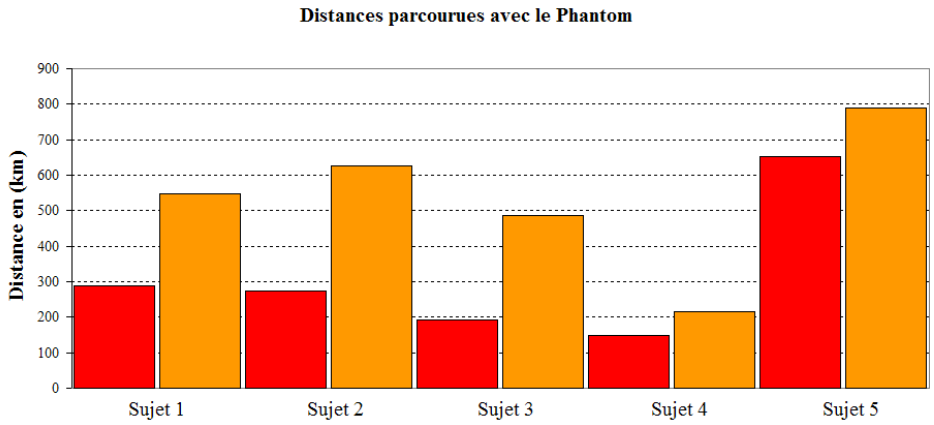


Figure 14.14 – Distances parcourues avec le phantom au cours des navigations virtuelles en modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE) en fonction des sujets. Les barres rouges (foncées) correspondent aux valeurs NO et les barres oranges (claires) aux valeurs HE. Les valeurs indiquées sont à l'échelle de la carte.

Par ailleurs, lors d'entretiens réalisés avec les sujets, ces derniers déclarent rencontrer plus de difficultés lors des navigations virtuelles en mode *Heading* (HE).

14.2.2 La navigation de « proche en proche » et les écarts par rapport à la route

Les trajectoires montrent qu'aucun sujet n'explore l'ensemble de la configuration. En effet, qu'il s'agisse de l'un ou l'autre des modes, les sujets n'utilisent quasiment jamais le Phantom pour toucher d'autres balises que celles à contourner. Notons que ces épisodes plus distants de l'itinéraire en mode

Heading (HE) sont l'occasion de nombreux mouvements hors configuration. Par ailleurs, les sujets 1, 2 et 4 s'écartent de la route en mode *Heading* (HE) seulement alors que sujet 5 s'écarte de la route dans les deux conditions. Cependant, ces écarts sont moins flagrants.

14.3 Synthèse sur les *patterns* d'explorations des navigations

Pour résumer, le principal résultat de cette analyse des *patterns* d'exploration et des trajectoires de navigation montre qu'aucun sujet n'explore l'ensemble des balises de la configuration au cours des navigations virtuelles avec SeaTouch. Ils se concentrent principalement sur les balises relatives à la route en cours.

Par ailleurs, les *patterns* d'exploration révèlent que les sujets réalisent plus de mouvements en conditions *Heading*(HE). A ce propos, ils déclarent que la navigation virtuelle est plus difficile avec la carte qui tourne et défile autour du voilier virtuel que lorsque celle-ci reste fixe.

Finalement, les sujets qui présentent une différence significative entre les précisions de repérage en mode *Northing* (NO) et en mode *Heading* (HE) ont le point commun de s'être écartés de la route en mode *Heading* (HE) seulement. Nous émettons cependant des réserves quant à ce constat dans le sens où les différences significatives sont peu nombreuses et notre échantillon de sujet reste relativement petit.

Chapitre 15

Discussion sur l'expérience de navigation

Au cours de cette expérience, notre but était d'étudier les conditions de navigation virtuelle avec SeaTouch pour l'amélioration de la représentation spatiale lors de l'apprentissage de l'espace maritime des marins aveugles. Nous avons donc émis l'hypothèse suivante :

La navigation virtuelle avec SeaTouch en mode *Heading* (HE) permet aux marins non-voyants de coordonner les représentations s'inscrivant dans les référentiels spatiaux de types égo et allocentrés plus précisément qu'en mode *Northing* (NO) (hypothèse 3).

Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons analysé les réponses aux questions non alignées posées à la fin des navigations virtuelles. D'une manière générale, la comparaison des résultats issus des navigations virtuelles en modes *Northing* (NO) et *Heading* (HE) ne révèle aucune différence significative. Plus précisément, lorsqu'on examine les résultats de chaque sujet, strictement aucune différence significative n'apparaît entre les réponses aux questions obtenues à la suite des navigations en mode *Northing* (NO) et en mode *Heading* (HE). Par ailleurs, l'analyse des *patterns* d'exploration des navigations a montré que les sujets ont une tendance générale à concentrer leur exploration sur la prochaine balise de leur route et n'explorent pas l'ensemble de la configuration. Ainsi, l'efficacité de la navigation virtuelle en mode *Heading* (HE) pour la coordination des référentiels spatiaux de types égo et allocentrés ne semble pas vérifiée.

Un second objectif consistait à étudier les transferts d'apprentissage entre les tâches de repérage au cours des navigations virtuelles et réelles. Plus précisément, nous cherchons à évaluer l'influence de la navigation virtuelle en mode *Heading* (HE) pour le repérage des marins aveugles en situation naturelle de navigation. Nous avons donc émis l'hypothèse suivante :

La préparation de navigation en mode *Heading* (HE) permet aux marins non-voyants de se situer plus précisément au cours de la navigation réelle que lorsqu'ils la préparent en mode *Northing* (NO) (hypothèse 4).

Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons analysé les réponses aux « questions situées ». Ces questions sont posées en cours de navigations réelles. Ces dernières font suite à des navigations virtuelles en mode *Northing* (NO) d'une part et *Heading* (HE) d'autre part. Le principal résultat montre une absence de différence significative entre la précision des réponses aux questions situées obtenues à la suite des navigations virtuelles en modes *Heading* (HE) et *Northing* (NO). Cependant l'examen individuel des résultats révèle que les sujets 1, 2 et 4 réalisent des performances relativement meilleures à la suite des navigations virtuelles en mode *Heading* (HE). Pour chacun, au moins une variable d'un niveau d'analyse présente une différence significative. L'analyse des trajectoires du voilier virtuel montre également que les sujets 1, 2 et 4 se sont parfois écartés de la route initialement préparée. Bien que ces résultats ne suffisent pas à valider l'hypothèse 4, certains éléments méritent d'être approfondis.

Afin d'expliquer ces résultats, nous nous intéressons aux activités cognitives des sujets au cours de cette expérience de navigation. En effet, les marins aveugles se trouvaient finalement face à une double tâche cognitive : la tâche de réalisation d'itinéraire proprement dite, et la tâche de repérage au sein de l'espace maritime. Comment ces deux tâches sont-elles combinées par les marins aveugles au cours de cette expérience ?

Par ailleurs, il semble que les sujets qui tirent profit des navigations virtuelles en mode *Heading* (HE) présentent le point commun de s'être écartés de la route. Nous approfondirons donc les processus apparemment mis en œuvre par les sujets rencontrant un épisode de « désorientation » au cours des navigations virtuelles en mode *Heading* (HE).

15.1 Réaliser un itinéraire et se repérer

15.1.1 L'absence de vision et l'actualisation de la position

En émettant les hypothèses 3 et 4, nous imaginions que la navigation avec SeaTouch en mode *Heading* (HE) amènerait les sujets à percevoir la configuration selon plusieurs orientations. Nous pensions alors que la multiplication des points de vue serait bénéfique pour la coordination des référentiels spatiaux de types égo et allocentrés. Bien que tous nos sujets parviennent à réaliser l'itinéraire dans les environnements virtuels et réels, aucun résultat issu des réponses aux questions non alignées ne témoigne de l'amélioration escomptée. Ainsi, la multiplication des points de vue haptiques inhérente à la navigation virtuelle en mode *Heading* (HE) ne favorise pas la coordination des référentiels spatiaux.

Ces résultats diffèrent de ceux obtenus par Tlauka et Wilson (1996) lors d'une expérience comparable dans un environnement visuel avec des individus voyants (*cf.* § 4.2.1 p.118). Une explication pourrait provenir de l'absence d'informations visuelles pour actualiser la représentation spatiale en

cours de navigation. En effet, Presson et Hazelrigg (1984) montrent que l'actualisation des voyants est automatique au fur et à mesure des déplacements. A l'inverse, Hatwell (1964) note un déficit dans l'accommodation des enfants aveugles. Les *patterns* d'exploration enregistrés montrent effectivement que nos sujets ne cherchent pas à actualiser leur position par rapport à l'ensemble de la configuration. Ils se focalisent plutôt sur la balise suivante. A ce propos, Loomis et Beall (1998) avancent que le référentiel de type égocentré est majoritairement sollicité pour éviter les obstacles. Il semble donc que les sujets aveugles naviguant virtuellement avec SeaTouch se contentent d'actualiser leur représentation en utilisant un référentiel de type égocentré mais ne l'enrichissent pas dans un référentiel de type allocentré par ailleurs.

15.1.2 La confrontation à une double tâche

Lorsque Magnusson et Rassmus-Gröhn (2004) demandent à des sujets aveugles d'apprendre une route dans un environnement virtuel comparable au mode *Heading* (HE) de SeaTouch, ces derniers y parviennent mais aucune tâche de repérage n'est réalisée en parallèle (*cf.* § 4.3.2.3, p.141). A l'inverse, quand Lahav et Mioduser (2008) proposent à des sujets aveugles d'apprendre une configuration dans un environnement virtuel et qu'ils évaluent la précision de la représentation construite, aucune tâche de réalisation d'itinéraire n'est effectuée au même moment (*cf.* § 4.3.2.3, p.143).

Au cours de notre expérience de navigation, les marins aveugles ont été confrontés à une double tâche : réaliser un itinéraire et se repérer simultanément. Les *patterns* d'exploration montrent que les sujets ont davantage investi la tâche de réalisation d'itinéraire. D'une manière générale, ces utilisateurs novices de SeaTouch ont tous réalisé des naufrages virtuels pendant la phase d'entraînement. Face à l'assourdissant bruit de vitres brisées déclenché par les collisions entre le voilier et la côte ou les balises, les sujets ont eu des réactions témoignant d'une « immersion réussie » au sein de l'environnement marin virtuel de SeaTouch. De ce fait, tout se passe comme s'ils prenaient des dispositions particulières pour réaliser l'intégralité de l'itinéraire sans s'échouer au détriment de la tâche de repérage dont les conséquences sont moins « sensibles ». En effet, les réponses aux questions situées au cours des navigations virtuelles suscitent un investissement moindre de la part des sujets. Bien qu'il soit évoqué dans la consigne que les mesures de performances ont lieu à partir des réponses aux questions et non à partir de la qualité de la réalisation de l'itinéraire, aucun sujet n'a cherché à évaluer l'exactitude de ses réponses aux questions situées en explorant la configuration avec le Phantom en cours de navigation virtuelle. Cette pauvreté des feedbacks au sein de la tâche de repérage entraîne l'absence de multiplicité des points de vue haptiques de l'ensemble de la configuration. Cet élément paraît expliquer l'absence d'amélioration de la coordination des référentiels spatiaux.

15.1.3 Synthèse sur la réalisation d'apprentissage et le repérage sans vision

Tout se passe donc comme si les sujets étaient particulièrement concentrés sur la réalisation de la route. La disposition du carnet de route leur permet de réaliser l'itinéraire en sollicitant principalement une représentation verbale composée des caps de la route. En effet, il aurait été possible qu'un sujet n'utilise que les informations vocales du cap du voilier et des azimuts des balises pour suivre sa route et contourner les balises. Dans ce cas, il n'existerait plus aucune différence entre les conditions de navigation en mode *Northing* (NO) et *Heading* (HE). Cette organisation implique cependant de ne pas s'écarter de la route.

En résumé, le repérage en cours de navigation est une difficulté accentuée par l'absence de vision. Or la double tâche de réalisation d'itinéraire et de repérage que nous avons proposée aux sujets les a amenés à investir plus particulièrement la tâche de direction du voilier. La crainte du naufrage dans un environnement virtuel peu familier d'une part, et la disposition d'un carnet de route d'autre part, semblent être à l'origine du sous investissement de la tâche de repérage.

15.2 Le repérage et la désorientation

15.2.1 Précisions sur la tâche de repérage

Lors de l'analyse des *patterns* d'exploration des navigations, nous avons remarqué que les sujets 1, 2 et 4 s'écartent de la route en mode *Heading* (HE). Or ces trois sujets sont ceux-là mêmes dont au moins une variable présente de meilleures réponses aux questions situées (en cours de navigation réelle) à la suite d'une navigation virtuelle en mode *Heading* (HE). Cependant, cette amélioration ne provient pas directement de la capacité à mieux coordonner les représentations s'inscrivant dans les référentiels de types égo et allocentrés puisque ces sujets ne présentent pas d'amélioration significative lors des réponses aux questions non alignées. Comme évoqué lors de la méthodologie spécifique de cette expérience de navigation (*cf.* §11.3.3.2, p.243), la différence entre les questions non alignées et situées émane des perceptions des sujets de leurs position et orientation actuelles. Alors que les réponses aux questions non alignées nécessitent d'imaginer des représentations issues des deux types de référentiel, la tâche de repérage induite par les questions situées demande aux sujets de coordonner la représentation issue des perceptions actuelles, s'inscrivant nécessairement dans un référentiel de type égocentré, avec leur intériorisation mentale de la configuration, s'inscrivant *a priori* dans un référentiel de type allocentré. Autrement dit, le repérage implique la coordination d'une représentation de type route (égo) basée sur des perceptions courantes et d'une représentation de type carte (allo) basée sur

une intériorisation antérieure.

15.2.2 Suggestion sur l'intéret de la désorientation

Si s'écarter de la route correspond à « se perdre », cela signifie alors que les sujets ayant connu un épisode de désorientation dans l'environnement virtuel ont temporairement rompu la relation existante entre leurs perceptions et leurs représentations de l'environnement. Le fait que ces sujets aient retrouvé leur itinéraire témoigne d'un retour à une coordination entre leur représentation de leur position et orientation perçues et leur représentation de la carte.

Comment les sujets 1, 2 et 4 auraient-ils pu tirer profit de la désorientation en mode *Heading* (HE) pour la tâche de repérage en navigation en situation naturelle ?

Pour que la désorientation puisse par la suite améliorer le repérage par rapport à la configuration, il faut nécessairement que les sujets coordonnent leurs position et orientation courantes avec l'ensemble de la configuration. En effet, la coordination avec un seul point de repère, la prochaine balise, ne pourrait expliquer une amélioration des réponses à nos questions situées portant sur d'autres balises plus éloignées.

D'après Wang et Spelke (2002), Waller *et al.* (2002) et Mou *et al.* (2004), les humains actualisent leurs relations temporaires avec l'environnement dans un référentiel de type égocentré au fur et à mesure de leur déplacement. Par contre en cas de désorientation, ces auteurs proposent le déclenchement d'un processus descendant sollicitant une représentation de type carte (allo) pour se repérer. Plus précisément, il s'agit ici de rappeler les invariants construits lors de l'encodage initial de la représentation. La recherche des repères correspondants dans l'environnement permet alors de « connecter » les points de vue courant (égo) et « aérien » (allo).

Au cours de leur désorientation en situation virtuelle, les sujets 1, 2 et 4, solliciteraient alors leur représentation de la configuration des balises dans un référentiel de type allocentré tout en explorant l'environnement afin de trouver des points de repère correspondant à leurs propres invariants précédemment intériorisés. Au regard des explorations en cours de navigation virtuelle, les sujets désorientés cherchent la balise la plus proche pour tenter de revenir vers la route mais n'explorent pas particulièrement l'ensemble de la configuration. Comment pourrait-on alors expliquer que les épisodes de désorientations des sujets 1, 2 et 4 entraînent des améliorations lors des réponses aux questions situées faisant appel à l'ensemble de la configuration ?

Bien qu'elle reste tout à fait hypothétique, nous proposons l'explication suivante. Rappelons tout d'abord que l'axe « sud-nord » correspond à l'orientation du point de vue initial d'encodage lors de la phase de découverte de la carte. Rappelons également que l'orientation du vent et le cap du voilier sont perceptibles en permanence aussi bien dans l'environnement virtuel qu'en situation naturelle. On peut alors supposer que les sujets perçoivent en permanence la direction du nord. En cas de

désorientation, les sujets utilisent le questionnement vocale de la balise la plus proche. Ils semblent ensuite concentrer leurs contacts à l'aide du Phantom sur cette balise sans chercher les autres. La situation de ce seul élément de la configuration ne peut pourtant pas suffire pour déduire les positions relatives des autres balises. Par ailleurs, la sensation permanente de l'axe « sud-nord » évoquée ci-dessus pourrait offrir aux sujets la possibilité de projeter cet axe sur cette seule balise perçue. Disposant d'un point de référence, la balise, et d'une orientation stable, le nord, les sujets déduiraient alors le positionnement de l'ensemble des balises grâce à l'utilisation de la représentation de la configuration qu'ils ont initialement encodée.

De cette manière, la désorientation en mode *Heading* (HE) imposerait aux sujets d'investir la tâche de repérage dans le but de poursuivre leur itinéraire. C'est le fait qu'ils répondent mieux à certaines questions situées qui nous fait imaginer que ces derniers sollicitent d'une certaine manière une représentation de type carte. Cet exercice de repérage à la suite d'une désorientation paraît faire office d'entraînement à l'utilisation d'une représentation de type carte (allo) depuis leur point de vue courant (égo).

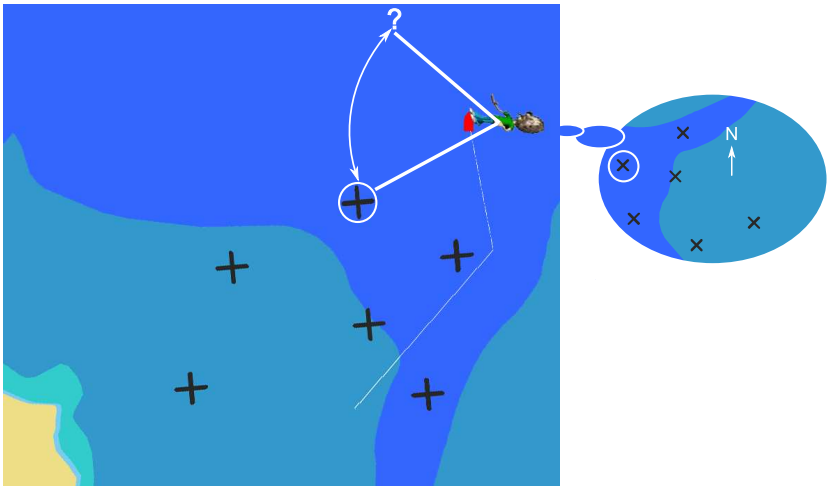


Figure 15.1 – L'utilisation de la représentation du point de vue initial d'encodage en cas d'épisode de désorientation. Lorsque le sujet se trouve désorienté il cherche un point de repère autour de lui et sollicite la représentation de son point de vue initial d'apprentissage pour se localiser. Cet opération nécessite la coordination des référentiels de types égo et allocentrés mais ne modifie pas la représentation existante.

15.2.3 Synthèse sur la désorientation

Pour résumer, les sujets ayant connu un épisode de désorientation semblent avoir été obligés d'investir plus particulièrement la tâche de repérage pour être en mesure de continuer leur itinéraire. A ce moment là, il semble que ces derniers réalisent un entraînement à la coordination de leur point de

vue courant par rapport à leur représentation initiale de la configuration. Ainsi, la désorientation en mode *Heading* (HE) peut potentiellement avoir permis aux sujets de faire le lien entre la balise la plus proche d'eux depuis un nouveau point de vue (nouvelle représentation de type route) et cette même balise dans l'ensemble de la configuration depuis le point de vue initial d'encodage (représentation existante de type carte). Cet entraînement peut être à l'origine des améliorations des réponses aux questions situées en mode *Heading* (HE) à la suite des épisodes de désorientation des sujets 1, 2 et 4. Cependant la faible quantité de points de repère entre la nouvelle représentation de type route et la représentation de type carte existante ne semble pas permettre un enrichissement de cette dernière. Cela expliquerait l'absence d'amélioration des réponses aux questions non alignées.

15.3 Conclusion de la discussion sur l'expérience de navigation

Finalement, l'analyse des résultats de l'expérience de navigation montre que la navigation virtuelle avec SeaTouch en mode *Heading* (HE) telle que nous l'avons pratiquée ne suffit pas à constituer une solution efficace pour aider les marins aveugles à coordonner les représentations s'inscrivant dans les référentiels de types égo et allocentrés. La focalisation sur la réalisation de l'itinéraire et l'absence d'exploration de l'ensemble de la configuration en cours de navigation virtuelle semble être à l'origine de ce résultat. Néanmoins, il apparaît que la désorientation peut amener les sujets à investir la tâche de repérage afin de poursuivre leur itinéraire. Les navigations virtuelles en mode *Heading* (HE) paraissent entraîner certains marins non-voyants à « se perdre puis se retrouver ». La légère amélioration des performances de repérage suggère que cet épisode ait été profitable à la coordination du point de vue courant (égo) avec la mémorisation initiale de la configuration globale (allo). La désorientation en environnement virtuel pour l'apprentissage du repérage en cours de navigation dans un milieu réel constitue donc un axe de recherche à approfondir.

Discussion Générale

Discussion générale

Cette thèse s'inscrit dans la problématique de l'accès à l'information spatiale et au déplacement en grand espace des personnes aveugles. Plus précisément, nous nous interrogions sur les apports de la réalité virtuelle pour la navigation à la voile des marins non-voyants.

Nous avons vu dans la revue de littérature que le développement spatial consiste à passer d'un espace vécu à un espace représenté grâce à l'acquisition de repères cohérents pour le sujet. Ces derniers sont alors réutilisés lors des déplacements du corps entier afin de relier le point du vue de l'individu avec une représentation plus aérienne de type carte. Il s'agit donc bien d'un problème de coordination des référentiels de types égo et allocentrés. Malgré l'absence de vision, différentes études témoignent de la capacité des aveugles à raisonner sur l'espace et à utiliser des cartes géographiques en relief. Cependant, sans information visuelle, l'actualisation de la position en cours de déplacement reste un problème délicat.

Ces dernières années, l'essor des nouvelles technologies et plus précisément la relative démocratisation de la réalité virtuelle a permis la conception de nouveaux dispositifs adaptés à la cécité. Parmi ceux-ci, les interfaces haptiques, les procédés de spatialisation du son et les systèmes de synthèse vocale offrent de nouvelles possibilités de présentation de l'information spatiale et de développement des aides à la navigation pour les personnes aveugles. Parallèlement, la pratique de la navigation à la voile de certains marins non-voyants a fait apparaître des besoins spécifiques dans ce domaine.

Dans ce contexte, nous avons mis au point SeaTouch, un logiciel haptique et auditif pour la préparation et le contrôle des déplacements à la voile des marins non-voyants. En tant qu'aide à la navigation, cette application fonctionne. Ainsi, les informations vocales instantanées sur le cap, la route, le vent, la profondeur, les balises alentours, etc., se sont révélées particulièrement efficaces pour suivre un itinéraire à la voile en situation de cécité. Outre cette fonction de guidage, avec l'utilisation d'une interface haptique (le Phantom), SeaTouch offre aux marins aveugles la possibilité de consulter des

cartes numériques. Par rapport aux cartes en relief classiques, les cartes virtuelles haptiques et auditives présentent notamment l'avantage de la simulation des navigations pour préparer des itinéraires. Plus précisément, il devient possible de faire pivoter et défiler l'environnement autour d'un voilier virtuel. Ainsi, les multiples orientations de ce type de navigation virtuelle présente des similarités avec les différents points de vue inhérents aux déplacements en milieu naturel.

L'objectif de ce travail a donc été d'étudier les explorations mises en œuvre et les représentations construites lors de l'utilisation de SeaTouch pour des transferts d'apprentissage dans le domaine de la cartographie maritime et du repérage en cours de navigation en situation de cécité.

La première question sur laquelle nous nous sommes penchés a concerné la possibilité de construire des représentations spatiales précises à l'aide d'une carte virtuelle de SeaTouch. Nous avons également cherché à identifier s'il existait des stratégies d'exploration haptique plus efficaces pour la coordination des référentiels spatiaux de types égo et allocentrés.

La seconde question que nous nous sommes posés portait sur les intérêts d'une carte haptique et auditive qui tourne et défile autour d'un voilier virtuel (mode *Heading*) pour la coordination des référentiels spatiaux de types égo et allocentrés et le repérage en cours de navigation.

Après le rappel de nos principaux résultats, nous tenterons une articulation de ceux-ci avec les connaissances existantes dans ce domaine. Finalement, nous évoquerons les perspectives de recherche dans le domaine de la réalité virtuelle pour la navigation des marins aveugles dont ce travail de thèse reste une approche pionnière.

Les apports

L'analyse des principaux résultats de nos expériences sous l'angle de la coordination des représentations issues des référentiels spatiaux de types égo et allocentrés apporte deux principales conclusions.

Notre premier résultat montre que les cartes virtuelles de SeaTouch permettent aux aveugles de construire des représentations spatiales d'une précision équivalente aux représentations élaborées à partir des cartes en relief. L'apport lié à ce résultat est de montrer que la stratégie d'exploration haptique du point central de référence adoptée par les sujets les plus efficaces se révèle particulièrement intéressante pour l'apprentissage de l'espace maritime en environnement virtuel en situation de cécité (expérience de cartographie).

Notre second résultat révèle que la navigation virtuelle en mode *Heading* (HE) ne suffit pas pour l'amélioration des performances spatiales des marins non-voyants. Cependant, un épisode de désorientation lors de navigations virtuelles dans ce mode *Heading* (HE) présenterait un intérêt potentiel pour le repérage en situation naturelle (expérience de navigation). Cette idée constitue notre second

apport.

Ces deux apports peuvent être coordonnés pour proposer une modélisation des déterminants de la cognition spatiale des marins aveugles avec SeaTouch (*cf.* figure 15.2).

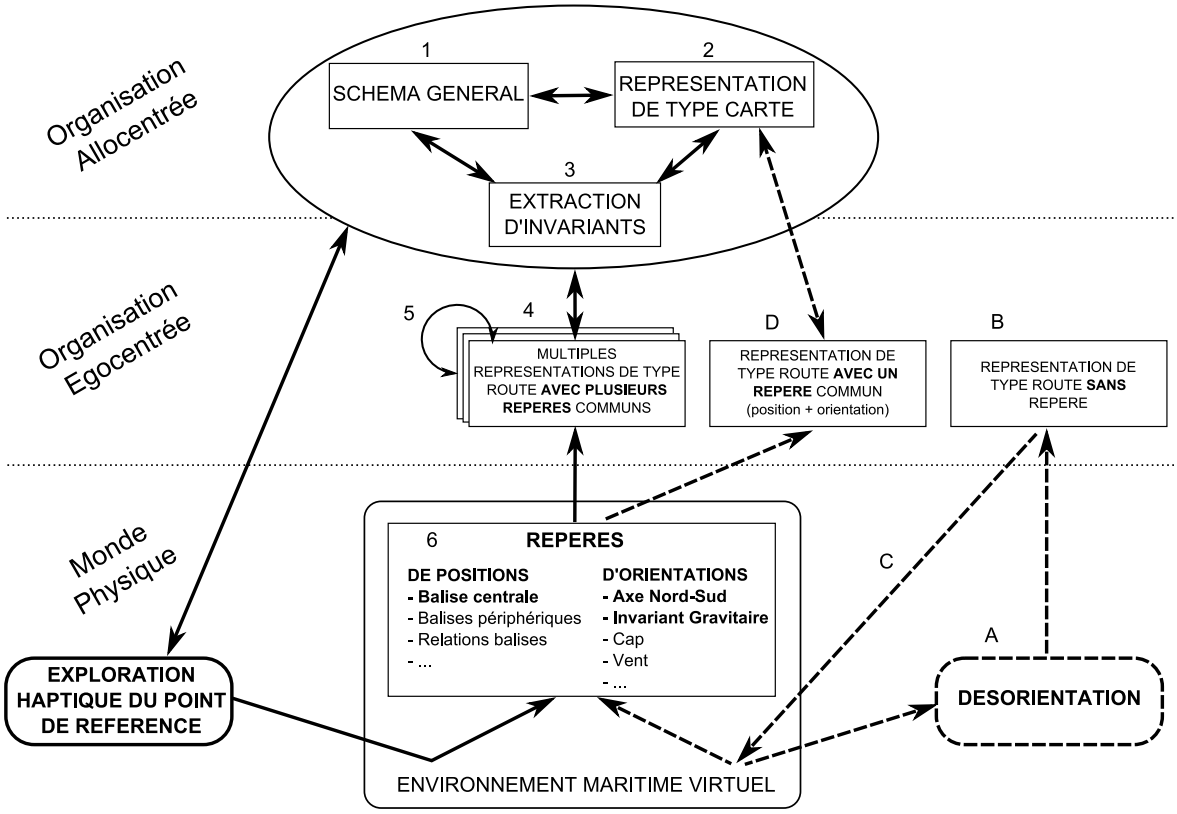


Figure 15.2 – Modèle de coordination des représentations issues des référentiels de types égo et allocentrés au sein d'un environnement maritime virtuel en situation de cécité. De bas en haut, ce schéma vise à agencer le monde physique, l'organisation égocentrée et l'organisation allocentrée. Bien que ces processus ne se déroulent pas simultanément, ce modèle propose d'articuler les mécanismes de l'exploration haptique du point central de référence (plutôt à gauche) et du repérage au cours d'un épisode de désorientation (plutôt à droite). Le circuit composé de flèches épaisses organise les déterminants de l'exploration haptique du point central de référence selon une boucle perception-action. Le circuit composé de flèches en tirets correspond à notre suggestion sur le repérage à la suite d'un épisode de désorientation. Il illustre comment une représentation de type route sans repère (boucle de la désorientation) peut être actualisée grâce à un repère commun avec la représentation de type carte (repérage). Ce modèle appliqué aux résultat de notre expérimentation est inspiré du modèle de coordination des référentiels spatiaux de Thinus-Blanc (1996) (*cf.* p.73).

La stratégie du point central de référence

Les processus cognitifs sous-jacents de la stratégie d'exploration haptique du point central de référence reposent principalement sur l'intériorisation d'invariants (sorte de règles d'encodage) pour

la structuration de la représentation de l'environnement au moyen de formes typiques déjà connues.

Les trajectoires en étoile des *patterns* d'exploration haptique des sujets ayant obtenu les meilleurs résultats renforcent l'idée selon laquelle la structuration mentale du monde qui nous entoure passe par la référence à des formes typiques, abstraites au sein d'un schéma général (1) (*cf.* figure 15.2).

Ce mécanisme de structuration conduit les sujets à réaliser un ensemble de comparaisons entre une forme typique (1), la représentation de type carte (2) de la configuration qu'ils sont en train de construire et leurs propres invariants (3). Ces comparaisons se déroulent de façon parallèle et réciproque tout au long de l'activité d'apprentissage afin d'aboutir à une adéquation.

Les invariants (3) sont au centre du processus de structuration de l'environnement. Ils sont donc en grande partie responsables de la coordination entre les référentiels de types égo et allocentrés. Plus précisément, ces invariants (3) sont à l'interface entre les représentations les plus abstraites (1 et 2) et les représentations de type route (4) se rapportant plus directement aux perceptions. Ces représentations de type route (4) sont approximativement aussi nombreuses qu'il y a d'actions réalisées dans l'environnement. Les comparaisons (5) de ces multiples représentations de type route (4) offrent la possibilité d'identifier différents repères communs. C'est une sorte de tri par comparaison entre ces représentations de type route comportant des repères communs (4) et les invariants (3) relatifs aux représentations (1 et 2) qui permet la coordination générale des actions, perceptions et représentations.

Dans la stratégie du point central de référence telle qu'elle a été appliquée par les sujets, la balise centrale de la configuration apparaît comme un point de repère (6). Le sujet l'intègre comme une référence par rapport à son propre corps. Il encode alors les relations avec les autres balises de la configuration (6) par des trajets manuels revenant toujours à ce point central. Ainsi, de multiples représentations avec des repères communs (4) apparaissent.

Par ailleurs, ces mouvements d'exploration se déroulent dans le plan vertical. Cela favorise l'encodage d'un axe correspondant à l'invariant gravitaire (6) aisément perçu par les sujets par rapport à leur propre corps (égo). De plus, cet axe vertical correspond à l'axe « nord-sud » de la carte (6). Ce repère culturel est largement utilisé pour structurer l'espace géographique (allo). De surcroît, cet axe correspond à l'orientation du vent (6) dans notre expérience de navigation. Ainsi, de multiples représentations avec des repères communs (4) privilégiés apparaissent à nouveau.

Finalement, les mouvements réalisés par les sujets lors de la stratégie du point central de référence entraînent l'encodage de multiples représentations de type route comportant de nombreux repères communs (4). Cette association de multiples segments autour d'un point de repère au centre de la configuration permet donc l'extraction d'invariants (3) particulièrement stables (processus ascendant). La forme en étoile ainsi intériorisée peut alors être décentrée du corps propre du sujet et soumise de façon privilégiée à des inférences spatiales (processus descendant). La complémentarité de ces deux processus ascendant et descendant permet donc une coordination efficace des représentations s'inscrivant dans les référentiels de types égo et allocentrés.

Le repérage pendant un épisode de désorientation

A la suite de l'expérience de navigation, nous proposons que les processus cognitifs sous-jacents du repérage au cours d'un épisode de désorientation reposent sur l'utilisation des repères ayant permis d'extraire les invariants. Ils permettent alors la coordination entre la représentation du point de vue courant et celle de l'espace tel qu'il a été initialement structuré.

En cas de désorientation (A) (*cf.* figure 15.2), le corrélation entre les repères perçus dans l'environnement (6) et la représentation de type carte (4) est rompue. Plus précisément, la représentation de type route issue du point de vue courant ne comporte pas de repère commun aux autres routes (B).

Le déclenchement d'un processus de repérage consiste à rechercher ce repère (C) dans l'environnement. L'identification de celui-ci entraîne alors l'apparition d'une nouvelle représentation de type route avec un repère commun (D). Cependant, dans le cas d'un simple repérage, la particularité de cette représentation de type route est de pouvoir s'accorder avec la représentation de type carte (2) sans pour autant la modifier. Dans ce cas, le processus de repérage ne participe donc pas à la structuration du monde qui nous entoure.

Au cours d'un épisode de désorientation lors d'une navigation virtuelle en mode *Heading* (HE), il semble que les principaux repères disponibles sont la balise la plus proche d'une part, et le vent (6) associé au nord d'autre part. Ces repères de position et d'orientation (6) permettent alors aux sujets de consulter leur représentation globale de la configuration (2) et ainsi de se repérer.

Cette opération de coordination semble fournir un entraînement au repérage dont les sujets peuvent profiter pour se situer plus précisément en milieu naturel. Ici, le mode *Heading* (HE) présente surtout l'intérêt d'« égarer » les sujets par rapport à la configuration sans pour autant leur faire « perdre le nord » au sens propre.

Bien que nous émettions des réserves devant la faible représentativité des résultats relatifs à la désorientation, les suppositions faites autour de ce mécanisme de repérage suite à la désorientation peuvent s'articuler avec les processus sollicités par la stratégie d'exploration haptique du point central de référence. Cette articulation repose essentiellement sur le repère commun (D) entre le point de vue courant et la représentation de type carte (4) (*cf.* figure 15.2).

Une proposition de hiérarchisation des niveaux de repérage

A la suite de ce travail de thèse, afin d'apporter des éléments de réflexions pour de futures expérimentations, nous proposons trois types de repérage pouvant être hiérarchisés selon trois niveaux de processus cognitifs (*cf.* tableau 15.1).

Niveaux de repérage proposés	**Désorientation préalable**	**Représentations de type route**	**Représentations de type carte**
Repérage sur l'itinéraire	absente	représentations initiales	représentations non sollicitées
Repérage de type route	présente	nouvelles représentations avec un repère commun	représentations consultées
Repérage de type carte	présente	nouvelles représentations avec plusieurs repères communs	représentations enrichies

Tableau 15.1 – Tableau récapitulatif des trois niveaux de repérage proposés

A un premier niveau, en l'absence d'épisode de désorientation, nous parlons de « repérage sur l'itinéraire ». Ce processus cognitif n'utilise que des représentations connues afin d'actualiser sa position au fur à mesure des déplacements dont la trajectoire était anticipée. Ici, les sujets n'acquièrent pas de nouvelles connaissances sur l'espace, puisqu'ils suivent un itinéraire sans rencontrer d'imprévu.

Dans notre expérience de navigation, les sujets ne s'écartant pas de l'itinéraire préparé se limitent alors à l'ajustement de leur cap.

De la même manière, une personne voyante empruntant un chemin quotidien n'a pas besoin de se remémorer le plan de la ville pour se rendre de son domicile à son lieu de travail.

A un second niveau, le « repérage de type route » vise à remédier à un épisode de désorientation. Le sujet utilise un point de repère de position et d'orientation pour actualiser une position imprévue dans une nouvelle représentation de type route. Ce raisonnement peut solliciter une représentation spatiale de type carte sans pour autant l'enrichir en raison d'une trop faible quantité de points de repère. Ici, les sujets n'acquièrent pas de nouvelle connaissance sur l'espace, mais s'entraînent à utiliser leur représentation de type carte initialement encodée pour revenir sur l'itinéraire préparé à partir

d'un seul point de repère.

Dans notre expérience de navigation, les sujets désorientés ne cherchent qu'une seule balise pour retrouver leur itinéraire. Afin de contourner la balise du bon côté, ces derniers doivent utiliser le nord à partir du cap ou du vent. Ils doivent alors se remémorer la carte pour positionner les autres balises de l'itinéraire. La perception de cette unique balise n'entraîne pas de feedback sur les autres. Les sujets n'enrichissent donc pas la représentation de cet espace maritime avec de nouveaux points de vue comportant plusieurs repères communs. Ils s'entraînent néanmoins à utiliser une seule balise et le nord pour déduire les positions des autres.

Dans le cas d'une personne voyante se trompant de chemin, la détection d'un seul point remarquable de l'itinéraire préparé lui offre la possibilité de retrouver son parcours. Cependant, l'absence d'identification d'autres repères communs aux connaissances des lieux limite les correspondances avec la carte mentale du secteur situé autour de ce lieu de travail.

A un troisième niveau, le « repérage de type carte » remédie également à un épisode de désorientation. Cependant ce processus cognitif consiste à utiliser plusieurs points de repère de positions et d'orientations pour actualiser une position imprévue par rapport à plusieurs représentations spatiales de type route. Sur la base de repères communs, les comparaisons entre ces différentes représentations de type route participent alors à l'enrichissement de la représentation de type carte. Les sujets parviennent alors à améliorer leur coordination des représentations issues des référentiels de types égo et allocentrés. Il s'agit donc de se repérer par rapport à l'environnement global indépendamment d'un itinéraire préparé.

Cette situation ne s'est pas présentée au cours de notre expérience de navigation. Pour cela, il aurait fallu que les sujets explorent différentes balises depuis des points de vue différents de ceux de la route initialement préparée. De cette manière, les correspondances entre les balises explorées depuis ces nouveaux points de vue et celles mémorisées lors de la préparation de la navigation aurait permis l'enrichissement de la représentation de la configuration.

Pour une personne voyante perdue dans la ville, l'identification de différents repères connus tels qu'un clocher d'église, un château d'eau et un immeuble par exemple présente également l'avantage de multiplier les correspondances avec les repères du plan de la ville. Ainsi, les actualisations successives des positions multiplient les points de vue et rendent possibles les comparaisons avec le plan. La carte mentale de la ville devient alors de plus en plus riche et efficace

Les perspectives

Cette étude s'inscrit dans la continuité des recherches actuelles sur les apports de la réalité virtuelle pour la cognition spatiale non visuelle. Au cours de ce travail, nous avons conçu SeaTouch et réalisé une première évaluation de ce nouveau logiciel pour l'apprentissage de l'espace maritime en situation de cécité.

Les résultats de l'expérience de cartographie apportent des précisions sur la nature des repères non visuels pour la construction d'une représentation spatiale précise à partir de l'exploration d'une carte haptique et auditive. Les résultats de l'expérience de navigation proposent la piste de la désorientation en environnement virtuel pour l'entraînement au repérage en milieu marin. Si ces apports correspondent à l'aboutissement de cette thèse, ils révèlent surtout le potentiel de SeaTouch, ou d'applications semblables, pour de futures investigations suivant différents axes de recherche dans le domaine la cognition spatiale. Nous en percevons au moins trois déjà présents dans la littérature.

Tout d'abord, des questions gravitant autour de l'apprentissage, de la systématisation et de la coordination des différentes stratégies d'exploration de l'espace en l'absence de vision pourraient être approfondies.

Par ailleurs, l'utilisation de la réalité virtuelle afin de préciser les mécanismes de la désorientation et du repérage en grand espace avec ou sans vision nous semble être un terrain expérimental particulièrement riche.

Finalement, afin de répondre à la demande du plus grand nombre, l'évolution d'un logiciel de réalité virtuelle tel que SeaTouch depuis le repérage en milieu maritime vers l'apprentissage de la navigation urbaine serait envisageable.

La question des stratégies d'exploration spatiale non visuelle a fait l'objet de nombreuses expérimentations ces trente dernières années. Nous avons vu que différents travaux ont ainsi examiné les mouvements des explorations locomotrices et haptiques. Ces études se déroulent souvent dans des environnements simplifiés.

La progression des connaissances sur l'utilisation des référentiels spatiaux et les nouvelles possibilités technologiques permettent maintenant d'envisager de nouvelles expériences sur les évolutions de ces stratégies au sein d'environnements géographiques de plus en plus complexes. Plus précisément, les environnements virtuels facilitent l'isolement des différents paramètres tels que la présence de l'invariant gravitaire, la variation des périmètres, l'accroissement de l'irrégularité des configurations, etc... De plus, l'informatique permet d'enregistrer systématiquement les *patterns* d'exploration et de développer des programmes de traitements quantitatifs qui élargiraient sensiblement les possibilités d'analyses. Ces traitements seront alors réalisables au sein de tâches se déroulant dans des environnements virtuels complexes se rapprochant de plus en plus du milieu naturel.

Par ailleurs, si la plupart des études se sont concentrées sur l'analyse des *patterns* d'exploration spontanés, nous pourrions également nous intéresser à leur progression en fonction du niveau d'expertise des individus. En effet, en présentant dix configurations à nos six sujets, les résultats seraient peut-être différents. Peut-être également que les difficultés liées à un manque de familiarité pourraient s'estomper au profit de la mise en place de stratégies spécifiquement adaptées à un plan de travail vertical ? Peut-être que le guidage des sujets les moins précis vers les stratégies des sujets les plus efficaces aurait un impact positif ?

Ce domaine de recherche offre donc de vastes perspectives expérimentales autour des stratégies d'exploration utilisées par des aveugles de différents niveaux d'expertise au sein d'environnements virtuels haptiques et auditifs de complexité croissante.

L'influence de la désorientation sur les résultats et les interprétations de notre expérience de navigation suggèrent également de nouvelles recherches pour vérifier certaines hypothèses. Comment le fait de « se perdre puis se retrouver » dans un environnement virtuel pourrait-il permettre un enrichissement de la représentation spatiale ? Si la coordination des référentiels spatiaux consiste principalement en la multiplication de représentations de type route, faudrait-il alors se perdre autant de fois qu'il existe de points de vue pour construire une représentation de type carte d'un environnement ? Si à l'inverse, elle consiste principalement à raisonner sur des repères privilégiés correspondant aux invariants d'une représentation de type carte, existerait-t-il alors une association de stratégies sensorimotrices et cognitives particulièrement efficiente ?

En présence d'informations visuelles, « se situer » semble être un processus plus implicite qu'en situation de cécité. En effet, l'abondance d'informations visuelles sur l'espace distant paraît favoriser un « repérage de type carte ». A l'inverse, chez les aveugles ce processus semble reposer sur une quantité d'informations plus réduites. L'actualisation nécessiterait alors plus d'efforts d'attention. Si la gravité semble avoir constitué un repère d'orientation implicite pour les sujets explorant la carte virtuelle de SeaTouch, peu d'informations relatives à l'ensemble de la configuration semblent participer au repérage lors des navigations virtuelles. L'utilisation d'un « repérage de type route » se trouve alors favorisé en l'absence de vision. Étudier les moyens d'inciter les marins aveugles à déclencher des processus de « repérage de type carte » sollicitant des repères explicites constitue donc un objectif de recherche.

L'expérience de navigation que nous avons proposée ne semble pas avoir amenée les sujets à utiliser ce « repérage de type carte ». Le carnet de route visait précisément à faciliter la tâche de réalisation d'itinéraire pour que les sujets puissent se concentrer sur la tâche de repérage en réponse aux questions situées. Malgré cette ambition, l'importante immersion dans la tâche de réalisation de l'itinéraire et les faibles sensations liées à la tâche de repérage ont amené les sujets à se concentrer sur le suivi de la route préparée. Nous pouvons donc envisager de mettre au point une expérience avec un guidage

moins important, c'est-à-dire sans route à suivre. Plus précisément, il s'agirait de faire en sorte que les sujets se « perdent » afin qu'ils aient besoin de chercher à « se retrouver » par rapport à l'ensemble de la configuration. Cependant il est nécessaire que ce repérage soit indispensable à la « survie » du voilier virtuel si nous voulons pouvoir véritablement étudier les mécanismes du « repérage de type carte » en situation de cécité. A ce propos, la mise en place d'un contexte de sauvetage où les marins aveugles devraient récupérer un « homme à la mer » mobile présenterait l'avantage de supprimer la préparation d'un itinéraire. Ensuite, on pourrait imaginer que le cap du voilier virtuel soit bloqué à intervalle régulier et que le contrôle du navire ne puissent être repris qu'après avoir fourni les relèvements de trois points remarquables. Ce type d'expérience amènerait les marins aveugles à pratiquer régulièrement un « repérage de type carte » afin d'éviter de fracassants naufrages virtuels.

Finalement, il serait tout à fait envisageable d'étendre ces recherches à d'autres types d'environnements. L'utilisation d'un dispositif de réalité virtuelle semblable à SeaTouch pourrait alors être mis à contribution pour l'apprentissage de l'espace urbain en l'absence de vision. Par rapport à la navigation maritime, les déplacements en ville comportent les contraintes des routes plus étroites et des obstacles plus nombreux. Cependant, les techniques associées à la canne blanche et le travail avec des chiens guides offrent des solutions efficaces pour l'évitement des obstacles de proximité tels que les murs ou les poteaux. La difficulté réside à nouveau dans le repérage et la réalisation d'inférences spatiales. En l'absence de vision, la ville peut-être assimilée à un grand espace. En effet, si les marins utilisent autant le compas (boussole) c'est notamment parce ce dernier fournit un repère de direction lorsque les navigateurs ne voient plus où ils vont. En ce sens, la navigation maritime et la navigation en situation de cécité présentent des similitudes. D'ailleurs, certains G.P.S vocaux utilisent des repères cardinaux numériques (0-360°) pour aider les aveugles à se guider à travers la complexité urbaine. Pourtant, rares en sont les adeptes. Dans ce contexte, il pourrait être opportun de proposer des entraînements à l'utilisation de ce type d'outil dans un environnement virtuel urbain. Outre l'étude de la construction de nouvelles représentations de type carte, ces navigations virtuelles pourraient permettre aux « navigateurs de nuit » de réaliser des essais et des ajustements avant d'entreprendre des périples en solitaire dans la « tempête urbaine ».

Bibliographie

Afonso, A., Katz, B., Blum, A., Jacquemin, C. et Denis, M. (2005). A Study of Spatial Cognition in an Immersive Virtual Audio Environment : Comparing Blind and Blindfolded Individuals. *In ICAD05 : International Conference on Auditory Display*.

Amorim, M. et Stucchi, N. (1997). Viewer-and object-centered mental explorations of an imagined environment are not equivalent. *Cognitive Brain Research*, 5(3):229–239.

Amorim, M., Trumbore, B. et Chogyen, P. L. (2000). Cognitive repositioning inside a desktop ve : The constraints introduced by first-versus third-person imagery and mental representation richness. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 9:165–186.

Amorim, M.-A. (2003). « what is my avatar seeing ? » : The coordination of « out-of-body » and « embodied » perspectives for scene recognition across views. *Visual Cognition*, 10:157–199.

Appelle, S. (1972). Perception and discrimination as a function of stimulus orientation : the" oblique effect" in man and animals. *Psychol Bull*, 78(4):266–78.

Appelle, S. et Goodnow, J. (1970). Haptic and visual perception of proportion. *Journal of Experimental Psychology*, 84:47–52.

Appelle, S., Gravetter, F. J. et Davidson, P. W. (1980). Proportion judgements in haptic and visual form perception. *Canadian Journal of Psychology*, 34:161–174.

Arditi, A., Holtzmann, J. et Kosslyn, S. (1988). Mental imagery and sensory experience in congenital blindness. *Neuropsychologia*, 26(1):1–12.

Ashmead, D., LeRoy, D. et Odom, R. (1990). Perception of the relative distances of nearby sound sources. *Perception and Psychophysic*, 47(4):326–31.

Ashmead, D. H., DeFord, L. D. et Northington, A. (1995). Contribution of listeners' approaching motion to auditory distance perception. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 21:239–256.

Astley, O. R. et Hayward, V. (2000). Design constraints for haptic surgery simulation. *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on*, 3.

Auvray, J. (2004). *Immersion et perception spatiale, L'exemple des dispositifs de substitution sensorielle.* Thèse de doctorat, Université Technologique de Compiègne.

Avizzano, C., Marcheschi, S., Angerilli, M., Fontana, M., Bergamasco, M., Gutierrez, T. et Mannegeis, M. (2003). A multi-finger haptic interface for visually impaired people. *In ROMAN03 : International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pages 165–170.

Avraamides, M. N., Loomis, J. M., Klatzky, R. L. et Golledge, R. G. (2004). Functional equivalence of spatial representations derived from vision and language : Evidence from allocentric judgments. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition,*, 30:301–314.

Barber, P. et Lederman, S. (1988). Encoding direction in manipulatory space and the role of visual experience. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 82:99–106.

Bartlett, F. (1932). *Remembering.* Cambridge : University Press.

Basdogan, C. et Srinivasan, A. M. (2002). Haptic rendering in virtuel environments. *In* Stanney, K. M., (Editeur) : *Handbook of virtual environment. Design, Implementation, And Applications*, pages 117–134. London : Lawrence Erlbaum associates.

Begault, D. (1994). *3-D sound for virtual reality and multimedia.* Boston : AP Professional.

Bennett, A. (1996). Do animals have cognitive maps ? *Journal of Experimental Biology*, 199(1):219–224.

Bentzen, B. (1972). Production and Testing of an Orientation and Travel Map for Visually Handicapped Persons. *New Outlook for the Blind*, 66(8):249–55.

Bergson, H. (1896). *Matière et mémoire.* Paris :PUF.

Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement.* O. Jacob : Paris.

Berthoz, A. (2005). Espace perçu, espace vécu, espace conçu. *In* Berthoz, A. et Recht, R., (Editeurs.) : *Les espaces de l'homme*, pages 127–160. Paris : Odile Jacob.

Biederman, I. (1987). Recognition-by-components : A theory of human image understanding. *Psychological Review*, 94(2):115–147.

Biggs, S. J. et Srinivasan, A. M. (2002). Haptic interfaces. *In* Stanney, K. M., (Editeur) : *Handbook of virtual environment. Design, Implementation, And Applications*, pages 93–115. London : Lawrence Erlbaum associates.

Blades, M. (1991). The development of the abilities required to understand spatial representations. *In* Mark, D. M. et Frank, A. U., (Editeurs.) : *Cognitive and linguistic aspects of geographic space*, pages 81–115. Dordrecht : Wolter Kluwer.

Blades, M., Ungar, S. et Spencer, C. (1999). Map Use by Adults with Visual Impairments. *The Professional Geographer*, 51(4):539–553.

Blattner, M., Sumikawa, D. et Greenberg, R. (1989). Earcons and icons : Their structure and common design principles. *Human-Computer Interaction*, 4:11–44.

Blauert, J. (1983). *Spatial hearing.* MIT Press : Cambridge, MA.

Blauert, J. (1997). *Spatial Hearing : The Psychophysics of Human Sound Localization.* London : MIT Press.

Bliss, J. P., Tidwell, P. D. et Guest, M. A. (1997). The effectiveness of virtual reality for administering spatial navigation training to fire fighters. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 6(1):73–86.

Bluteau, J., Coquillart, S., Payan, Y. et Gentaz, E. (2008). Haptic Guidance Improves the Visuo-Manual Tracking of Trajectories. *PLoS ONE*, 3(3).

Bregman, A. (1994). *L'analyse de scène auditives : l'audition dans des environnements complexes.* Paris : PUF.

Brewster, S., Wright, P. et Edwards, A. (1992). A detailed investigation into the effectiveness of earcons. *In ICAD92 : The First International Conference on Auditory Display*, pages 471–498.

Bryant, D. et Tversky, B. (1999). Mental Representations ofPerspective and Spatial Relations From Diagrams and Models. *Learning, Memory*, 25(1):137–156.

Bryant, D. J., Tversky, B. et N., F. (1992). Internal and external spatial framworks for representing described scenes. *Journal of memory and language*, 1:74–98.

Burgess, N. (2001). Memory for events and their spatial context : models and experiments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 356(1413):1493–1503.

Burgess, N. (2006). Spatial memory : how egocentric and allocentric combine. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(12):551–557.

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

Carreiras, M. et Codina, B. (1992). Spatial cognition of the blind and sighted : visual and amodal hypotheses. *Cahiers de psychologie cognitive*, 12(1):51–78.

Casey, S. (1978). Cognitive mapping by the blind. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 72:297–301.

Casiez, G. (2004). *Contribution à l'étude des interfaces haptiques Le DigiHaptic : un périphérique haptique de bureau à degrés de liberté séparés*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille.

Chance, S., Gaunet, F., Beall, A. et Loomis, J. (1998). Locomotion Mode Affects the Updating of Objects Encountered During Travel : The Contribution of Vestibular and Proprioceptive Inputs to Path Integration. *Presence*, 7(2):168–178.

Cheng, K. (1986). A purely geometric module in the rat's spatial representation. *Cognition*, 23(2):149–178.

Christou, C. et Bülthoff, H. (2000). Perception, representation and recognition : A holistic view of recognition. *Spatial Vision*, 13(2):265–275.

Coluccia, E., Mammarella, I., De Beni, R., Ittyerah, M. et Cornoldi, C. (2007). Remembering object position in the absence of vision : Egocentric, allocentric, and egocentric decentred frames of reference. *Perception*, 36(6):850–64.

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

Darken, R. et Banker, W. (1998). Navigating in natural environments : A virtual environment training transfer study. *In VRAIS98 : Virtual Reality Annual Symposium*, volume 98, pages 12–19.

Darken, R. et Sibert, J. (1996). Navigating large virtual spaces. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 8(1):49–71.

Davidson, P. (1972). Haptic judgments of curvature by blind and sighted humans. *Journal of experimental psychology*, 93(1):43–55.

Davidson, P., Abbott, S. et Gershenfeld, J. (1974). Influence of exploration time on haptic and visual matching of complex shape. *Perception and Psychophysics*, 15:539–543.

De Vega, M., Cocude, M., Denis, M., Rodrigo, M. J. et Zimmer, H. D. (2001). The interface between language and visuo-spatial representations. *In* Denis, M., Logie, R. H., Cornoldi, C., De Vega, M. et J., E., (Editeurs.) : *Imagery, language, and visuo-spatial thinking*, pages 109–136. Hove : Psychology Press.

Denis, M., Chevalier, N. et Eloi, S. (1989). Imagerie et répétition mentale dans l'acquisition d'habiletés motrices. *Tâches, traitement de l'information et comportements dans les activités physiques et sportives. Issy-les-Moulineaux : Éditions EAP*, pages 11–37.

Denis, M. et Cocude, M. (1997). On the Metric Properties of Visual Images Generated from Verbal Descriptions : Evidence for the Robustness of the Mental Scanning E ect. *European Journal of Cognitive psychology*, 9(4):353–379.

Dennett, D. (1978). *Brainstorms*. Montgomery : Bradford books.

Diwadkar, V. et McNamara, T. (1997). Viewpoint dependance in scene recognition. *Psychological Science*, 8(4):302–307.

Dodds, A., Howarth, C. L. et C., C. D. (1982). The Mental Maps of the Blind : The Role of Previous Visual Experience. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 76(1):5–12.

Dodds, A. G. et Carter, D. C. (1983). Memory for movement in blind children. *Journal of Motor behaviour*, 15:343–352.

Downs, R. et Stea, D. (1977). *Map in minds : Reflections on cognitive mapping*. New York : Harper and Row.

Downs, R. M. et Stea, D. (1973). Theory. *In* Downs, R. M. et Stea, D., (Editeurs.) : *Image and environment*, pages 1–7. Chicago : Aldine.

Durlach, N. I. et Mavor, A. S. (1995). *Virtual reality : Scientific and technological challenges*. Washington : National Academy Press.

Easton, R. et Sholl, M. (1995). Object-Array Structure, Frames of Reference, and Retrieval of Spatial Knowledge. *Learning Memory*, 21(2):3–50.

Ellis, S. R. (1994). What are virtual environment ? *In IEEE Computer Graphics and application*, pages 17–22.

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

Fajen, B. et Warren, W. (2003). Behavioral dynamics of steering, obstacle avoidance, and route selection. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Perform*, 29(2):343–62.

Farrell, M., Arnold, P., Pettifer, S., Adams, J., Graham, T. et Mac Manamon, M. (2003). Transfer of route learning from virtual to real environments. *Journal of Experimental Psychology : Applied*, 9(4):219–227.

Farrell, M. et Robertson, I. (1998). Mental rotation and the automatic updating of body-centered spatial relationships. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 24(1):227–233.

Feigenbaum, J. et Morris, R. (2004). Allocentric versus egocentric spatial memory after unilateral temporal lobectomy in humans. *Neuropsychology*, 18(3):462–72.

Feltz, D. et Landers, D. (1983). The effects of mental practice on motor skill learning and performance : A meta-analysis. *Journal of Sport Psychology*, 5(1):25–57.

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

Foo, P., Warren, W. H., Duchon, A. et Tarr, M. J. (2005). Do Humans Integrate Routes Into a Cognitive Map ? Map-Versus Landmark-Based Navigation of Novel Shortcuts. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 31(2):195–215.

Foulke, E. (1982). Perception, cognition and the mobility of blind pedestrians. *In* Potegal, M., (Editeur) : *Spatial abilities : development and physiological foundations*, pages 55–76. Sans Diego : Academic Press.

Franklin, N. et Tversky, B. (1990). Searching imagined environments. *Journal of Experimental Psychology : General*, 119(1):63–76.

Frauenberger, C. et Noisternig, M. (2003). 3D Audio Interface for the Blind. *In ICAD03 : International Conference on Auditory Display, Boston, USA*, pages 280–283.

Freundschuh, S. (2000). Micro- and macro-scale environments. *In* Kitchin, R. et Freundschuh, S., (Editeurs.) : *Cognitive mapping. Past, present and future*, pages 125–146. London : Routledge.

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

Friedman, A. et Kohler, B. (2003). Bidimensional regression : Assessing the configural similarity and accuracy of cognitive maps and other two-dimensional data sets. *Psychological Methods*, 8:468–491.

Fruchterman, J. (1996). Talking maps and gps systems. *In Rank Prize Funds Symposium on Technology to Assist the Blind and Visually Impaired.*

Fuchs, P., Berthoz, A. et Vercher, J. (2006). Introduction à la réalité virtuelle. *In* Fuchs, P., Moreau, G., Berthoz, A. et J.L., V., (Editeurs.) : *Le traité de la réalité virtuelle. Volume 1 : L'homme et l'environnement virtuel*, pages 2–22. Paris : Les Presses Mines.

Gallistel, C. (1990). *The organization of learning.* Cambridge : MIT Press.

Gaunet, F., Martinez, J. L. et Thinus-Blanc, C. (1997). Early-blind subjects' spatial representation of manipulatory space : exploratory strategies and reaction to change. *Perception*, 26(3):345–366.

Gaunet, F. et Thinus-Blanc, C. (1996). Early-blind subjects' spatial abilities in the locomotor space : exploratory strategies and reaction-to-change performance. *Perception*, 25(8):967–981.

Gentaz, E. (2005). Explorer pour percevoir l'espace avec la main : le sens haptique. *In* Thinus-Blanc, C. et Bullier, J., (Editeurs.) : *Agir dans l'espace*, pages 33–56. Paris : Editions de la Maison des sciences de l'homme.

Gentaz, E. et Gaunet, F. (2006). L'inférence haptique d'une localisation spatiale chez les adultes et les enfants : étude de l'effet du trajet et du délai dans une tâche de complètement de triangle. *L'année psychologique*, 106:167–190.

Gentaz, E. et Hatwell, Y. (1996). Role of gravitational cues in the haptic perception of orientation. *Perception and Psychophysics*, 58:1278–92.

Gentaz, E. et Hatwell, Y. (2000). Le traitement haptique des propriétés spatiales et materielles des objets. *In* Hatwell Y., S. A. et E., G., (Editeurs.) : *Toucher pour Connaître. psychologie cognitive de la perception tactile manuelle*, pages 129–162. Paris : PUF.

Gibson, J. (1977). Perceiving, acting and knowing : toward an ecological psychology. *In* Shaw, R. et Bransford, J., (Editeurs.) : *The theory of affordances*, pages 67–82. Hillsdale : N. J, Lawrence Erlbaum.

Gibson, J. (1979). *The Ecological Approach to Perception.* Boston : Haughton Mifflin.

Gill, H. S. (1984). Review of outdoor sound propagation. Rapport technique, Oakland : Wilson, Ihrig, and Associates.

Gillner, S. (1998). Navigation and Acquisition of Spatial Knowledge in a Virtual Maze. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10(4):445–463.

Giraudo, M. et Pailhous, J. (1994). Distortions and fluctuations in topographic memory. *Memory and Cognition*, 22(1):14–26.

Golldege, R., Smith, T., Pellegrino, J., Doherty, S. et Marshall, S. (1985). A conceptual model and empirical analysis of children's acquisition of spatial knowledge. *Journal of environmental psychology*, 5(2):125–152.

Golledge, R. (1991). Tactual Strip Maps as Navigational Aids. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 85(7):296–301.

Golledge, R. (1993). Geography and the Disabled : A Survey with Special Reference to Vision Impaired and Blind Populations. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 18(1):63–85.

Golledge, R. (1999). Human wayfinding and cognitive maps. *In* Golledge, R., (Editeur) : *Wayfinding behavior cognitive mapping and other spatial processes*, pages 1–45. London : The John Hopkins University Press.

Golledge, R. et Spector, A. (1978). Comprehending the urban environment : Theory and practice. *Geographical Analysis*, 10(4):403–426.

Golledge, R. et Stimpson, R. (1997). Spatial cognition, cognitive mapping, and cognitive maps. *In* Golledge, R. et Stimpson, R., (Editeurs.) : *Spatail behavior : A geographic perspective*, pages 224–266. New York : Guildford press.

Golledge, R. G. (1987). Environmental cognition. *In* Stokols, D. et I., A., (Editeurs.) : *Handbook of environmental psychology*, pages 131–174. New York : John Wiley and Sons.

Grush, R. (2000). Self, World and Space : The Meaning and Mechanismsof Ego-and Allocentric Spatial Representation. *Brain and Mind*, 1(1):59–92.

Guillot, A. et Collet, C. (2005). Duration of Mentally Simulated Movement : A Review. *Journal of Motor Behavior*, 37(1):10–20.

Gutierrez, T. (2004). Enhanced network accessibility for the blind and visually impaired. Rapport technique, Labein, Madrid.

Haber, L., Haber, R., Penningroth, S., Novak, K. et Radgowski, H. (1993). Comparison of nine methods of indicating the direction to objects : data from blind adults. *Perception*, 22(1):35–47.

Hardwick, D., McIntyre, C. et Pick Jr, H. (1976). The Content and Manipulation of Cognitive Maps in Children and Adults. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 41(3):1–55.

Hart, R. A. et Moore, G. T. (1973). The development of spatial cognition : A review. *In* Downs, R. et Stea, D., (Editeurs.) : *Image and Environment*, pages 246–288. New York : Aldine.

Hatwell, Y. (1964). Rôle des éléments figuratifs dans la génèse des opérations spatiales. *In* Piaget, J.and Grize, V. et Bang, J., (Editeurs.) : *L'épistémologie de l'espace, Etudes d'epistémologie génétique*, pages 173–201. Paris : PUF.

Hatwell, Y. (1986). *Toucher l'espace : la main et la perception tactile de l'espace.* Presses universitaires de Lille.

Hatwell, Y. (2003). *Psychologie cognitive de la cécité précoce.* Paris : Dunod.

Hatwell, Y. et Martinez-Sarocchi, F. (2000). La lecture tactile des cartes et dessins, l'accès des aveugles aux oeuvres d'art. *In* Y., H., A., S. et E., G., (Editeurs.) : *Toucher pour Connaître. psychologie cognitive de la perception tactile manuelle*, pages 267–286. Paris : PUF.

Heller, M. (1989). Picture and pattern perception in the sighted and the blind : the advantage of the late blind. *Perception*, 18(3):379–389.

Helmholtz, H. (1954). *On the Sensations of Tone 2em ed.* Dover Publications, Incorporated (ouvrage original paru en 1877).

Herman, J. E., Chatman, S. P. et Roth, S. E. (1983). Cognitive Mapping in Blind People : Acquisition of Spatial Relationships in a Large-Scale Environment. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 77(4):161–66.

Hermelin, B. et Connor, O. (1971). spatial coding in normal, autistic and blind children. *Perceptual and motor skills*, 33:127–132.

Hermer, L. et Spelke, E. (1994). A geometric process for spatial reorientation in young children. *Nature*, 370(6484):57–59.

Hermer, L. et Spelke, E. (1996). Modularity and development : the case of spatial reorientation. *Cognition*, 61(3):195–232.

Hicheur, H., Pham, Q. C., Arechavaleta, G., Laumond, J. P. et Berthoz, A. (2007). The formation of trajectories during goal-oriented locomotion in humans. I. A stereotyped behaviour. *European Journal of Neuroscience*, 26(8):2376–2390.

Hicheur, H., Vieilledent, S., Richardson, M., Flash, T. et Berthoz, A. (2005). Velocity and curvature in human locomotion along complex curved paths : a comparison with hand movements. *Experimental Brain Research*, 162(2):145–154.

Hilbert, D. (1902). *The fondations of geometry.* Open Court Publishing Company : University of Illinois (reprint 1950).

Hill, E. et Ponder, P. (1976). *Orientation and Mobility Techniques : A Guide for the Practitioner.* American Foundation for the Blind.

Hill, E. W. et Rieser, J. J. (1993). How persons with visual impairments explore novel spaces : Strategies of good and poor performers. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 87:8–15.

Hodgson, E. et Waller, D. (2006). Lack of Set Size Effects in Spatial Updating : Evidence for Offline Updating. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 32(4):854–866.

Holdstock, J., Mayes, A., Cezayirli, E., Isaac, C., Aggleton, J. et Roberts, N. (2000). A comparison of egocentric and allocentric spatial memory in a patient with selective hippocampal damage. *Neuropsychologia*, 38(4):410–425.

Hollins, M. et Kelley, E. K. (1988). Spatial updating in blind and sighted people. *Perception and psychophysics*, 43(4):380–388.

Holmes, M. et Sholl, M. (2005). Allocentric Coding of Object-to-Object Relations in Overlearned and Novel Environments. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 31(5):1069–108719.

Honoré, J., Richard, C. et Mars, F. (2002). Perception de l'image du corps et action. *In* Coello, Y. et Honoré, J., (Editeurs.) : *Percevoir s'orienter et agir dans l'espace, approche pluridisciplinaire des relations perception-action*, page 140. Marseille : Solal.

Hosseini, M., Malric, F. et Georganas, N. (2002). A haptic virtual environment for industrial training. *In HAVE02 : Haptic Virtual Environments and Their Applications, Internationnal Workshop*, pages 25–30.

Hudson, L. M. (1984). Measurement of mental representation of space in the visually handicapped. *In Louisville Space Conference, Louisville.*

Hunter, I. (1954). Tactile-kinesthetic perception of straightness in blind and sighted humans. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 7:149–154.

Jacobson, D. (1998). Cognitive mapping without sight : Four preliminary studies of spatial learning. *Journal of Environmental Psychology*, 18:189–305.

Jacobson, R. (1999). *Exploring Geographies of Blindness : Learning, Reading and Communicating Geographic Space.* Thèse de doctorat, Queen's University of Belfast.

Jansen-Osmann, P. (2007). Spatial knowledge of adults and children in a virtual environment : The role of environmental structure. *European Journal of Developmental Psychology*, 4(1):251– 272.

Jansson, G., Petrie, H., Colwell, C., Kornbrot, D., Fanger, J., Konig, H., Billberger, K., A., H. et S., F. (2000). Haptic virtual environment for blind people exploratory experiments with two devices. *The International Journal of Virtual Reality*, 4:10–20.

Jeannerod, M. (1994). The representing brain : Neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and Brain Sciences*, 17(2):187–245.

Jehoel, S., Mac Callum, D., Rowell, J. et Ungar, S. (2006). An empirical approach on the design of tactile maps and diagrams : The cognitive tactualization approach. *British Journal of Visual Impairment*, 24:67–75.

Juurmaa, J. (1965). An analysis of the components of orientation ability and mental manipulation of spatial relationships. Rapport technique, Helsinski, Finland : Institute of occupational health.

Kahane, J. P. (2002). *L'enseignement des sciences mathématiques : commission de réflexion sur l'enseignement des mathématiques*. Paris : Odile Jacob.

Kaplan, S. (1973). Cognitive Maps in Perception and Thought. *In* Downs, R. M. et Stea, D., (Editeurs.) : *Image and environment*. Chicago : Aldine.

Kelso, J., Scholz, J. et Schöner, G. (1986). Nonequilibrium phase transitions in coordinated biological motion : critical fluctuations. *Physics Letters A*, 118(6):279–284.

Kennedy, J., Gabias, P. et Heller, M. (1992). Space, haptics and the blind. *Geoforum*, 23(2):175–189.

Kitchin, R. (1994). Cognitive maps : what are they and why study them ? *Journal of environmental psychology*, 14(1):1–19.

Kitchin, R., Blades, M. et Golledge, R. (1997). Understanding spatial concepts at the geographic scale without the use of vision. *Progress in Human Geography*, 21(2):225–242.

Klatzky, R. (1995). Performance of Blind and Sighted Persons on Spatial Tasks. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 89(1):70–82.

Klatzky, R. (1998). Allocentric and egocentric spatial representations : Definitions, distinctions, and interconnections. *Spatial cognition. An interdisciplinary approach to representing and processing spatial knowledge*, pages 107–127.

Klatzky, R. (1999). Path completion after haptic exploration without vision : Implications for haptic spatial representations. *Perception and Psychophysics*, 61:220–35.

Klatzky, R. et Lederman, S. (1993). Toward a computational model of constraint-driven exploration and haptic object identification. *Perception*, 22(5):597–621.

Klatzky, R., Lippa, Y., Loomis, J. et Golledge, R. (2003). Encoding, learning, and spatial updating of multiple object locations specified by 3-D sound, spatial language, and vision. *Experimental Brain Research*, 149(1):48–61.

Kosslyn, S. (1976). Can imagery be distinguished from other forms of internal representation ? Evidence from studies of information retrieval time. *Memory & Cognition*, 4(3):291–297.

Kosslyn, S. (1996). Mental image. *In* Jones, C. A., (Editeur) : *Sensorium : Embodied experience, technology, and contemporary art*, pages 169–170. Cambridge : MIT Press.

Kosslyn, S., Ball, T. et Reiser, B. (1978). Visual images preserve metric spatial information : evidence from studies of image scanning. *Journal of Experimental Psychology and Human Perception and Performance*, 4(1):47–60.

Kosslyn, S., Ganis, G. et Thompson, W. (2003). Mental imagery : against the nihilistic hypothesis. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3):109–111.

Kosslyn, S. M. (1995). Through the glass lightly (viewpoint : The future ; section on psychology). *Science*, 267:1615.

Kosslyn, S. M., Van Kleeck, M. H. et Kirby, K. N. (1990). A neurologically plausible model of individual differences in visual imagery. *In* Hampson, P., Marks, D. et Richardson, J., (Editeurs.) : *Imagery : Current Developments*, pages 39–77. London : Routledge.

Kramer, G. (1993). *Auditory Display : Sonification, Audification, and Auditory Interfaces*. Perseus Publishing.

Kugler, P. et Turvey, M. (1987). *Information, natural law, and the self-assembly of rhythmic movement*. London : Lawrence Erlbaum Associates.

Kuipers, B. (1978). Modeling spatial knowledge. *Cognitive science*, 2:129–153.

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

Kuipers, B. (1983). The cognitive map : could it have been any other way ? *In* Pick, H. L. et Acredolo, L. J., (Editeurs.) : *Spatial Orientation : Theory, Research and Application*, pages 345–359. New York : Plenum Press.

Lahav, O. et Mioduser, D. (2008). Haptic-feedback support for cognitive mapping of unknow spaces by people who are blind. *International Journal of Human-Computer Studies*, 66:23–35.

Landau, B. (1986). Early map use as an unlearned ability. *Cognition*, 22(3):201–223.

Lea, G. (1975). Chronometric Analysis of the Method of Loci. *Journal of Experimental Psychology (Human Perception and Performance)*, 104(2):95–104.

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

Lederman, S. et Klatzky, R. (1993). Extracting object properties through haptic exploration. *Acta psychologica*, 84(1):29–40.

Lederman, S. J., Klatzky, R. L., Collins, R. et Wardel, J. (1987). Exploring environments by hand and foot : time-based heuristics for encoding distance in movement space. *Journal of Experimental Psychology : Human Learning, Memory and Cognition*, 13:606–614.

Lenay, C. (2005). Constitution de l'espace et immersion. *Arobase*, 1:85–93.

Leonard, J. et Newman, R. (1967). Spatial orientation in the blind. *Nature*, 215(5108):1413–1414.

Levine, M. (1982). You-Are-Here Maps : Psychological Considerations. *Environment and Behavior*, 14(2):221.

Levinson, S. (1996). Frames of reference and Molyneux s question : Crosslinguistic evidence. *In* Bloom, P., Peterson, M., Nadel, L. et Garrett, M., (Editeurs.) : *Language and space. Language, speech and communication*, pages 385–436. Cambridge : MIT Press.

Levitt, T. et Lawton, D. (1990). Qualitative navigation for mobile robots. *Artificial Intelligence*, 44(3):305–360.

Lloyd, R. (1989). Cognitive Maps : Encoding and Decoding lnformation. *Annals of the Association of American Geographers*, 79(1):101–124.

Logan, G. (1995). Linguistic and Conceptual Control of Visual Spatial Attention. *Cognitive Psychology*, 28(2):103–174.

Lomov, B. (1966). Manual interaction in the processus of tactile perception. Rapport technique.

Loomis, J. et Beall, A. (1998). Visually controlled locomotion : Its dependence on optic flow, three-dimensional space perception, and cognition. *Ecological Psychology*, 10(3-4):271–285.

Loomis, J., Golledge, R. et Klatzky, R. (1998a). Navigation System for the Blind : Auditory Display Modes and Guidance. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 7(2):193–203.

Loomis, J., Klatzky, R., Golledge, R., Cicinelli, J., Pellegrino, J. et Fry, P. (1993). Nonvisual navigation by blind and sighted : Assessment of path integration ability. *Journal of Experimental Psychology : General*, 122(1):73–91.

Loomis, J., Lippa, Y., Klatzky, R. et Golledge, R. (2002). Spatial Updating of Locations Specified by 3-D Sound and Spatial Language. *Learning, Memory*, 28(2):335–345.

Loomis, J. M., Blascovich, J. J. et Beall, A. C. (1999). Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 31(4):557–564.

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

Lumbreras, M. et Sánchez, J. (1999). Interactive 3D sound hyperstories for blind children. *In SIGCHI09 conference on Human factors In Computing Systems*, pages 318–325. ACM Press New York, NY, USA.

Lutz, R. J. (2006). Prototyping and evaluation of landcons : Auditory objects that support wayfinding for blind travelers. *Accessibility and Computing*, 86:8–11.

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

Mac Adams, S. (1994). Audition : physiologie, perception et cognition. *In* Richelle, M., Requin, J. et M., R., (Editeurs.) : *Traité de psychologie expérimental (Tome I)*, pages 283–344. Paris : PUF.

Mac Namara, T. (1986). Mental representations of spatial relations. *Cognitive psychology(Print)*, 18(1):87–121.

Magnusson, C., Gutierrez, T. et Rassmus-Gröhn, K. (2007). Test of pan and zoom tools in visual and non-visual audio haptic environments. *In International Conference on Enactive Interfaces, Grenoble, France.*

Magnusson, C. et Rassmus-Gröhn, K. (2004). A Dynamic Haptic-Audio Traffic Environment. *Proc. of Eurohaptics*, pages 5–7.

Makino, H., Ishii, I. et Nakashizuka, M. (1996). Development of navigation system for the blind using gps and mobile phone connection. *In the 18th annual meeting of the IEEE EMBS.*

Marr, D. (1982). *Vision : A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information.* New York : Henry Holt and Co., Inc.

Massof, R. (2003). Auditory assistive devices for the blind. *International Conference on Auditory Display, Boston.*

McCullagh, P. et Weiss, M. R. (2001). Modelling : Considerations for motor skills performance and psychological responses. *In* Singer, R. N., Hausenblaus, H. A. et M., J. C., (Editeurs.) : *Handbook of sport psychology*, pages 205–238. New York : Wiley.

Meijer, O. G. (1988). *The Hierarchy debate : perspectives for a Theory and History of Movement Science.* Free University Press : Amsterdam.

Middlebrooks, J. et Green, D. (1991). Sound Localization by Human Listeners. *Annual Review of Psychology*, 42(1):135–159.

Milgram, S. (1973). *Environment and cognition.* New York : Seminar Press.

Millar, S. (1976). Spatial representation by blind and sighted children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 21:460–479.

Millar, S. (1979). The utilization of external and movement cues in simple spatial tasks by blind and sighted children. *Perception*, 8(1):11–20.

Millar, S. (1988). Models of Sensory Deprivation : The Nature/Nurture Dichotomy and Spatial Representation in the Blind. *International Journal of Behavioral Development*, 11(1):69.

Millar, S. (1990). Research on braille and graphics. *In* Emiliani, P. L., (Editeur) : *Techniques and Devices for the Blind : Concerted Action on Technology and Blindness.* Brussels : Medical and Health Research Programme of the European Community.

Millar, S. (1994). *Understanding and Representing Space : Theory and Evidence from Studies with Blind and Sighted Children.* Oxford : University Press.

Milner, A. D. et Goodale, M. A. (1995). *The Visual Brain in Action ().* Oxford : Oxford University Press.

Mittelstaedt, M. et Glasauer, S. (1991). Idiothetic navigation in gerbils and humans. *Zool. Jb. Physiol*, 95(314):427–435.

Montello, D. R. et Pick, H. L. J. (1993). Integrating knowledge of vertically aligned large-scale space. *Environment and Behavior*, 25:457–483.

Moore, G. et Golledge, R. (1976). *Environmental Knowing : Theories, Research, and Methods.* Dowden, Hutchinson & Ross.

Morrongiello, B., Humphrey, G., Timney, B., Choi, J. et Rocca, P. (1994). Tactual object exploration and recognition in blind and sighted children. *Perception*, 23(7):833–848.

Morrongiello, B., Timney, B., Humphrey, G., Anderson, S. et Skory, C. (1995). Spatial Knowledge in Blind and Sighted Children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 59(2):211–233.

Mou, W., Fan, Y., Mac Namara, T. P. et Owen, C. B. (2008). Intrinsic frames of reference and egocentric viewpoints in scene recognition. *Cognition*, 106:750–769.

Mou, W. et McNamara, T. (2002). Intrinsic Frames of Reference in Spatial Memory. *Learning, Memory*, 28(1):162–170.

Mou, W., McNamara, T., Rump, B. et Xiao, C. (2006). Roles of Egocentric and Allocentric Spatial Representations in Locomotion and Reorientation. *Learning, Memory*, 32(6):1274–1290.

Mou, W., McNamara, T., Valiquette, C. et Rump, B. (2004). Allocentric and egocentric updating of spatial memories. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 30(1):142–157.

Neisser, U. (1967). *Cognitive psychology.* Appleton-Century-Crofts : New York.

Nico, D., Israël, I. et Berthoz, A. (2002). Interaction of visual and idiothetic information in a path completion task. *Experimental Brain Research*, 146(3):379–382.

Ochaita, E. et Huertas, J. (1993). Spatial representation by person whoa are blind : A study of the effect of learning and development. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 87:37–41.

O'Connor, N. et Hermelin, B. (1972). Seeing and hearing and space and time. *Perception and psychophysics*, 11:46–48.

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

Orlick, T. et Partington, J. (1986). *Psyched ! : Inner Views of Winning.* Coaching Association of Canada.

Paillard, J. (1971). Les déterminants moteurs de l'organisation de l'espace. *Cahiers de Psychologie*, 14:261–316.

Paillard, J. (1994). L'intégration sensori-motrice et idéo-motrice. *In* Richelle, M. Requin, J. et M., R., (Editeurs.) : *Traité de psychologie expérimental (Tome I)*, pages 925–961. Paris : PUF.

Pani, J. et Dupree, D. (1994). Spatial reference systems in the comprehension of rotational motion. *Perception*, 23(8):929–46.

Parenthoën, M., Jourdan, T. et Tisseau, J. (2004). Ipas : Interactive phenonenological animation of the sea. *In ISOPE04 : Society of Offshore and Polar Engineering.*

Passini, R., Dupre, A. et Langlois, C. (1986). Spatial mobility of the visually handicapped active person : A descriptive study. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 80(8):904–907.

Passini, R. et Proulx, G. (1988). Wayfinding without Vision : An Experiment with Congenitally Totally Blind People. *Environment and Behavior*, 20(2):227.

Passini, R., Proulx, G. et Rainville, C. (1990). The Spatio-Cognitive Abilities of the Visually Impaired Population. *Environment and Behavior*, 22(1):91.

Peruch, P. et Gaunet, F. (1998). Virtual environments as a promising tool for investigating human spatial cognition. *Cahiers de psychologie cognitive*, 17(4-5):881–899.

Peruch, P., Pailhous, J. et Deutsch, C. (1986). How do we locate ourselves on a map : a method for analyzing self-location processes. *Acta Psychol (Amst)*, 61(1):71–88.

Peruch, P., Vercher, J. et Gauthier, G. (1995). Acquisition of Spatial Knowledge Through Visual Exploration of Simulated Environments. *Ecological Psychology*, 7(1):1–20.

Petrie, H., Johnson, V., Strothotte, T., Raab, A., Michel, R., Reichert, L. et Schalt, A. (1997). MoBIC : An Aid to Increase the Independent Mobility of Blind Travellers. *British Journal of Visual Impairment*, 15(2):63.

Pham, Q., Hicheur, H., Arechavaleta, G., Laumond, J. et Berthoz, A. (2007). The formation of trajectories during goal-oriented locomotion in humans. II. A maximum smoothness model. *European Journal of Neuroscience*, 26(8):2391–2403.

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

Piaget, J. (1961). *Les mécanismes perceptifs : modèles probabilistes, analyse génétique, relations avec l'intelligence.* Paris : PUF.

Piaget, J. (1973a). *Introduction à l'épistémologie génétique.* Paris : PUF.

Piaget, J. (1973b). *La construction du réel chez l'enfant.* Paris : Delachaux et Niestlé.

Piaget, J. et Inhelder, B. (1948). *La représentation de l'espace chez l'enfant.* Paris : PUF.

Poincaré, H. (1895). L'espace et la geometrie. *Revue de métaphysique et de morale*, 3(1895):631–646.

Poincaré, H. (1902). *La science et l'hypothèse*. Flammarion, 1930.

Postma, A., Zuidhoek, S., Noordzij, M. et Kappers, A. (2007). Differences between early-blind, late-blind, and blindfolded-sighted people in haptic spatial-configuration learning and resulting memory traces. *Perception*, 36(8):1253–1265.

Presson, C. et Hazelrigg, M. (1984). Building spatial representations through primary and secondary learning. *Journal of experimental psychology. Learning, memory, and cognition*, 10(4):716–722.

Presson, C. C. et Montello, D. R. (1994). Updating after rotational and translational body movements : coordinate structure of perspective space. *Perception*, 23(12):1447–55.

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

Pylyshyn, Z. (2003). Explaining mental imagery : now you see it, now you don't Reply to Kosslyn et al. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3):111–112.

Raleigh, J. (1894). *Theory of Sound*. Macmillan.

Revesz, G. (1950). *Psychology and art of the blind*. Longmans : London.

Richard, F., Vaz-Cerniglia, C. et Portalier, S. (2004). Évolution des procédures d'exploration haptique chez des sujets voyants, aveugles tardifs et aveugles précoces. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, 54(4):227–236.

Richard, J. (1990). *Les activités mentales : Comprendre, raisonner, trouver des solutions,*. Armand Colin : Paris.

Rieser, J. (1989). Access to knowledge of spatial structure at novel points of observation. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 15:1157–1165.

Rieser, J., Guth, D. et Hill, E. (1982). Mental processes mediating independent travel : Implications for orientation and mobility. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 76:213–218.

Rieser, J., Guth, D. et Hill, E. (1986). Sensitivity to perspective structure while walking without vision. *Perception*, 15(2):173–88.

Rieser, J., Hill, E., Talor, C., Bradfield, A. et Rosen, S. (1992). Visual experience, visual field size, and the development of nonvisual sensitivity to the spatial structure of outdoor neighborhoods explored by walking. *Journal of Experimental Psychology : General*, 121:210–221.

Robin, F. et Denis, M. (1991). Description of perceived or imagined spatial networks. *In* Logie, R. et Denis, M., (Editeurs.) : *Mental images in human cognition*, pages 141–152. Amsterdam : North-Holland.

Rock, I. (1997). *Indirect Perception.* Cambridge : MIT Press.

Roskos-Ewoldsen, B., McNamara, T. P., Shelton, A. L. et Carr, W. (1998). Mental representations of large and small spatial layouts are orientation dependent. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition.*, 24:215–26.

Rossano, M. et Warren, D. (1989a). Misaligned maps lead to predictable errors. *Perception*, 18(2):215–29.

Rossano, M. J. et Warren, D. (1989b). The importance of alignment in blind subject's use of tactual maps. *Perception*, 18:805–816.

Roure, R., Collet, C., Deschaumes-Molinaro, C., Delhomme, G., Dittmar, A. et Vernet-Maury, E. (1999). Imagery quality estimated by autonomic response is correlated to sporting performance enhancement. *Physioligal Behavavior*, 66(1):63–72.

Rowell, J. et Ungar, S. (2003a). The world of touch : an international survey of tactile maps. Part 1 : production. *British Journal of Visual Impairment*, 21(3):98–104.

Rowell, J. et Ungar, S. (2003b). The world of touch : an international survey of tactile maps. Part 2 : design. *British Journal of Visual Impairment*, 21(3):105–110.

Ruddle, R., Payne, S. et Jones, D. (1997). Navigating buildings in desk-top virtual environments : Experimental investigations using extended navigational experience. *Journal of Experimental Psychology : Applied*, 3(2):143–159.

Russier, S. (2000). *L'influence des processus tactilo-kinesthésiques sur l'appréhension de formes géométriques bi-dimensionnelles.* Thèse de doctorat, Université Lumières Lyon 2, Farnce.

Salisbury, K., Conti, F. et Barbagli, F. (2004). Haptic Rendering : Introductory Concepts. *In IEEE Computer Graphics and applications.* IEEE Computer Society.

Sanchez, J. et Hassler, T. (2007). AudioMUD : A Multi-User Virtual Environment for Blind People. *Virtual Rehabilitation, 2007 International Workshop on*, pages 64–71.

Sánchez, J., Jorquera, L., Muñoz, E. et Valenzuela, E. (2000). VirtualAurea : Perception through spatialized sound. *Proceedings of the 3rd International Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technology. Alghero, Sardnia : University of Reading (United Kingdom).*

Sánchez, J. H. et Sáenz, M. A. (2006). Assisting the mobilization through subway networks by users with visual disabilities. *Proceedings of the International Conference Series On Disability, Virtual Reality And Associated Technologies, Esbjerg Denmark.*, pages 183–190.

Satalich, G. (1995). Navigation and Wayfinding in Virtual Reality : Finding the Proper Tools and Cues to Enhance Navigational Awareness. Mémoire de D.E.A., University of Washington.

Schafer, W. A. et Bowman, D. A. (2004). Evaluating the effects of frame of reference on spatial collaboration using desktop collaborative virtual environments. *Virtual Reality*, 7:164–174.

Schinazi, V. (2005). Spatial representation and low vision : Two studies on the content, accuracy and utility of mental representations. Rapport technique, Casa working paper.

Schlaegel, J. T. F. (1953). The dominant method of imagery in blind as compared to sighted adolescents. *Journal of genetical psychology*, 83(2):265–77.

Schmidt, R. (1975). A Schema Theory of Discrete Motor Skill Learning. *Psychological Review*, 82(4):225–60.

Schmidt, R. A. et Young, D. E. (1987). Transfer of movement control in motor skill learning. *In* Cormier, S. M. et D., H. J., (Editeurs.) : *Transfer of learning. Contemporary research and applications*, pages 47–79. San Diego : Academic Press, Inc.

Sedes, A., Courribet, B. et Thiebaut, J. (2003). Egosound, an egocentric interactive and real-time approach of sound space. *Proceedings of the DAFX-03.*

Sedgwick, H. (1983). Environment-centered representation of spatial layout : Available visual information from texture and perspective. *Human and machine vision*, pages 425–458.

Shea, C. et Wulf, G. (2005). Schema Theory : A Critical Appraisal and Reevaluation. *Journal of Motor Behavior*, 37(2):85–102.

Shelton, A. et McNamara, T. (1997). Multiple views of spatial memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 4(1):102–106.

Shelton, A. et McNamara, T. (2001). Systems of Spatial Reference in Human Memory. *Cognitive Psychology*, 43(4):274–310.

Shepard, R. et Hurwitz, S. (1984). Upward direction, mental rotation, and discrimination of left and right turns in maps. *Cognition*, 18(1-3):161–193.

Sherwood, D. et Lee, T. (2003). Schema theory : Critical review and implications for the role of cognition in a new theory of motor learning. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 74(4):376–382.

Shilling, R. D. et Shinn-Cunningham, B. (2002). Virtual auditory display. *In* Stanney, K. M., (Editeur) : *Handbook of virtual environment. Design, Implementation, And Applications*, pages 65–92. London : Lawrence Erlbaum associates.

Sholl, M. (1987). Cognitive maps as orienting schemata. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 13(4):615–628.

Sholl, M. et Nolin, T. (1997). Orientation Specificity in Representations of Place. *Learning, Memory*, 23(6):1494–1507.

Siegel, A. (1981). The externalization of cognitive maps by children and adults : In search of ways to ask better questions. *In* Lieben, L. S., Patterson, A. et Newcombe, N., (Editeurs.) : *Spatial representation and behavior across the life span : Theory and application*, pages 167–194. New York : Academic Press.

Siegel, A. et White, S. (1975). The development of spatial representations of large-scale environments. *In* Reese, H., (Editeur) : *Advances in Child Development and Behavior*, pages 10–55. New York : Academic Press.

Simonnet, M. (2002). Voile et cécité : l'utilisation d'un système de perceptions sensorielles d'un barreur non-voyant tardif. mémoire de maîtrise s.t.a.p.s. soutenu à l'université de bretagne 0ccidental à brest.

Simonnet, M. (2004). La construction d'une représentation spatiale non visuelle : une étude sur la régate sonore des marins non-voyants. Mémoire de D.E.A., Université de Bretagne 0ccidental à Brest.

Simonnet, M., Guinard, J.-Y. et Tisseau, J. (2005). Auditory and tactile modalities for a non visual representation : A blind sailing application. *In VC05 : Virtual Concept, Biarritz, France.*

Simonnet, M., Guinard, J.-Y. et Tisseau, J. (2006a). Preliminary work for vocal and haptic navigation software for blind sailors. *International Journal Of Disabilty and Human Developpement*, 52:61–67.

Simonnet, M., Guinard, J.-Y. et Tisseau, J. (2006b). Preliminary work for vocal and haptic navigation software for blind sailors. *In ICDVRAT07 : International Conference Series On Disability, Virtual Reality And Associated Technologies, Esbjerg, Danmark.*

Simonnet, M., Jacobson, R. D. et Rowell, J. (2007a). Touch, hear and sea : A simulator for the blind sailor's geographical representation. *In ICC07 : International conference of cartography, Moscow, Russia.*

Simonnet, M., Vieilledent, S., Guinard, J.-Y. et Tisseau, J. (2007b). Can haptic maps contribute to spatial knowledge of blind sailors ? *In ENACTIVE07 : International Conference on Enactive Interfaces, Grenoble, France, pp. 259-262.*

Simons, D. et Wang, R. (1998). Perceiving Real-World Viewpoint Changes. *Psychological Science*, 9(4):315–320.

Smith, A., Gilchrist, I., Cater, K., Ikram, N., Nott, K. et Hood, B. (2008). Reorientation in the real world : The development of landmark use and integration in a natural environment. *Cognition.*

Speigle, J. et Loomis, J. (1993). Auditory distance perception by translating observers. *Symposium on Research Frontiers in Virtual Reality*, pages 92–99.

Spencer, C. et Travis, J. (1985). Learning a new area with and without the use of tactile maps : a comparative study. *British Journal of Visual Impairment*, 3(1):5.

Stanney, K. et Salvendy, G. (1998). Aftereffects and Sense of Presence in Virtual Environments : Formulation of a Research and Development Agenda. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 10(2):135–187.

Streri, A. (2000). Exploration manuelle et perception tactile chez le nourrisson. *In* Hatwell Y., S. A. et E., G., (Editeurs.) : *Toucher pour Connaître. psychologie cognitive de la perception tactile manuelle*, pages 53–70. Paris : PUF.

Talkenberg, H. (1996). Electronic guide dog - a technical approach on in-town navigation. paper presented at the rank prize funds symposium on technology to assist the blind and visually impaired. Rapport technique, Grasmere, England.

Taylor, H. et Tversky, B. (1996). Perspective in Spatial Descriptions. *Journal of Memory and Language*, 35(3):371–391.

Tellevik, J. M. (1992). Influence of Spatial Exploration Patterns on Cognitive Mapping by Blindfolded Sighted Persons. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 86(5):221–224.

Thinus-Blanc, C. (1987). The cognitive map concept and its consequences. *In* Ellen, P. et Thinus-Blanc, C., (Editeurs.) : *Cognitive Processes in Animal and Man*, pages 1–19. The Hague : Martinus.

Thinus-Blanc, C. (1988). Animal spatial cognition. *In* Weiskrantz, L., (Editeur) : *Thought without Language*, pages 371–395. Oxford : University Press.

Thinus-Blanc, C. (1996). *Animal Spatial Cognition : Behavioural and Brain Approach.* World Scientific.

Thinus-Blanc, C. et Gaunet, F. (1997). Representation of space in blind persons : vision as a spatial sense ? *Psychological Bulletin*, 121(1):20–42.

Thorndyke, P. et Hayes-Roth, B. (1982). Differences in spatial knowledge acquired from maps and navigation. *Cognitive Psychology*, 14:560–589.

Tlauka, M., Brolese, A., Pomeroy, D. et Hobbs, W. (2005). Gender differences in spatial knowledge acquired through simulated exploration of a virtual shopping centre. *Journal of Environmental Psychology*, 25(1):111–118.

Tlauka, M. et Wilson, P. (1996). Orientation-Free Representations from Navigation through a Computer-Simulated Environment. *Environment and Behavior*, 28(5):647–664.

Tobler, W. (1965). Computation of the correspondence of geographical patterns. *Papers in Regional Science*, 15(1):131–139.

Tolman, E. (1948). Cognitive map in rats and men. *Psychological Review*, 55:189–209.

Tran, T., Letowski, T. et Abouchacra, K. (2000). Evaluation of acoustic beacon characteristics for navigation tasks. *Ergonomics*, 43(6):807–827.

Trowbridge, C. (1913). On Fundamental Methods of Orientation and "Imaginary Maps'". *Science*, 38(990):888–897.

Trullier, O., Wiener, S., Berthoz, A. et Meyer, J. (1997). Biologically based artificial navigation systems : preview and prospect. *Progress in Neurobiology*, 51(5):483–544.

Tversky, B. (1981). Distortions in memory for maps. *Cognitive Psychology*, 13(3):407–433.

Tversky, B. (1993). Cognitive maps, Cognitive collages, ans spatial mental model. *COSIT93 : Spatial Information Theory : A Theoretical Basis for GIS : European Conference.*

Tversky, B. (2003). Structures Of Mental Spaces : How People Think About Space. *Environment and Behavior*, 35(1):66.

Tversky, B. et Hemenway, K. (1984). Objects, parts, and categories. *Journal of experimental psychology. General*, 113(2):169–193.

Tversky, B., Morrison, J. et Betrancourt, M. (2002). Animation : can it facilitate. *International Journal of Human-Computer Studies*, 57(4):247–262.

Ungar, S. et Blades, M. (1996). The Ability of Visually Impaired Children to Locate Themselves on a Tactile Map. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 90(6):526–535.

Ungar, S., Blades, M. et Spencer, C. (1995a). Mental rotation of a tactile layout by young visually impaired children. *Perception*, 24:891–900.

Ungar, S., Blades, M. et Spencer, C. (1995b). Visually impaired children's strategies for memorising a map. *British Journal of Visual Impairment*, 13(1):27.

Ungar, S., Blades, M. et Spencer, C. (1997). Strategies for knowledge acquisition from cartographic maps by blind and visually impaired adults. *Cartographic Journal*, 34(2):93–110.

Ungar, S., Blades, M., Spencer, C. et Morsely, K. (1994). Can Visually Impaired Children Use Tactile Maps to Estimate Directions ? *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 88(3):221–33.

Veraart, C. et Wanet-Defalque, M. (1987). Representation of locomotor space by the blind. *Perception and Psychophysic*, 42(2):132–139.

Vidal, M., Amorim, M. et Berthoz, A. (2004). Navigating in a virtual three-dimensional maze : how do egocentric and allocentric reference frames interact ? *Cognitive Brain Research*, 19(3):244–258.

Viste, H. (2004). *Binaural Localisation and separation techniques.* Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.

Vitense, H., Jacko, J. et Emery, V. (2002). Foundation for improved interaction by individual with visual impairment through multimodal feedback. *Universal-Access-in-the-Information-Society*, 2:76–87.

von Senden, S. M. (1932). *Space and Sight : The Perception of Space and Shape in the Congenitally Blind Before and After Operation.* Glencoe : Free Press.

Vygotsky, L. S. (1930). *Mind of society.* Cambridge.

Waller, D., Hunt, E. et Knapp, D. (1998). The Transfer of Spatial Knowledge in Virtual Environment Training. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 7(2):129–143.

Waller, D., Montello, D., Richardson, A. et Hegarty, M. (2002). Orientation Specificity and Spatial Updating of Memories for Layouts. *Learning, Memory*, 28(6):1051–1063.

Walter, H. et Robinson, A. (1983). *Cartographic innovations : International handbook of mapping terms to 1900.* Map Collector Publications, Ltd.

Wang, R. et Spelke, E. (2000). Updating egocentric representations in human navigation. *Cognition*, 77(3):215–250.

Wang, R. et Spelke, E. (2002). Human spatial representation : insights from animals. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(9):376–382.

Wang, R. F. et Simons, D. (1999). Active and passive scene recognition across views. *Cognition*, 70(2):191–210.

Warren, W. (2006). The Dynamics of Perception and Action. *Psychological Review*, 113(2):358–389.

Waterman, S. et Gordon, D. (1984). A quantitative-comparative approach to analysis of distortion in mental maps. *The Professional Geographer*, 36(3):326–337.

Wheatheford, D. L. (1985). Representing and manipulating spatial information from different environments : models to neighborhoods. *In* Cohen, R., (Editeur) : *The Development of Spatial Cognition*, pages 41–70. Hillsdale : Lawrence Erlbaum Associates.

Wickens, C. D. et Baker, P. (1995). Cognitive issues in virtual reality. *In* Barfield, W. et A., F. T., (Editeurs.) : *Virtual environment and advance interface design*, pages 514–541. Oxford : University Press.

Williams, A. M., Davids, K. et Williams, J. G. (1999). *Visual Perception and action in Sport*. Oxford : Taylor and Francis.

Witmer, B., Bailey, J., Knerr, B. et Parsons, K. (1996). Virtual spaces and real world places : transfer of route knowledge. *International Journal of Human-Computer Studies*, 45(4):413–428.

Witmer, B., Sadowski, W. et Finkelstein, N. (2002). VE-based training strategies for acquiring survey knowledge. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 11(1):1–18.

Wolpert, D. et Flanagan, J. (2001). Motor prediction. *Current Biology*, 11(18):729–732.

Wolpert, D. et Kawato, M. (1998). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Networks*, 11(7-8):1317–1329.

Worchel, P. (1951). Space perception and orientation in the blind. *Psychological monographs*, 65:332–347.

Zinchenko, V. et Lomov, B. (1960). The function of hand and eye movements in the process of perception. *Voprossy Psychology*, 1:12–26.

Zipser, D. (1986). Biologically plausible models of place recognition and goal location. *In* McClelland, J. L. et Rumelhart, D. E., (Editeurs.) : *Computational Models Of Cognition And Perception Series*, pages 432–470. Cambridge : MIT Press.