

SIMULATION MENTALE, MEMOIRE SPATIALE, LOCOMOTION et ESCALADE SPORTIVE

Stéphane Vieilledent

▶ **To cite this version:**

Stéphane Vieilledent. SIMULATION MENTALE, MEMOIRE SPATIALE, LOCOMOTION et ESCALADE SPORTIVE. [Rapport de recherche] Institut National du Sport et de l'Education Physique (INSEP). 2002. hal-01871829

HAL Id: hal-01871829
https://insep.hal.science//hal-01871829

Submitted on 11 Sep 2018

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.



Laboratoire Mouvement Action et Performance

SIMULATION MENTALE, MEMOIRE SPATIALE, LOCOMOTION

et

ESCALADE SPORTIVE

Stéphane Vieilledent

Projet subventionné par le ministère de la Jeunesse et des Sports

2002

Participants

Les personnes suivantes ont participé à ce projet de recherche :

Alain Berthoz – Lab. de la Perception et de l'Action – Collège de France - Paris
Albert Gaudin – Biometrics France - Orsay
Aline Motte – Lab. Mouvement Action et Performance – Insep - Paris
Anne Françoise Raybaud – Fédération Française de la Montagne et de l'Escalade
Gilles Dietrich – Kihoptsys - Marseille
Marie-Dominique Giraudo – Faculté des Sciences du Sport – Marseille
Michelange Amorim – Centre de recherche en Sciences du sport – Orsay
Stéphane Dalbera – Atopos – Fontenay sous Bois
Stephen Kosslyn - Harvard University - Cambridge, MA -USA
Yves Kerlirzin – U. René Descartes – UFR Staps - Paris

Sommaire succinct

I - Introduction 8

II - Revue de questions 10

III - Expérience 1 : Etude préliminaire des indices visuels nécessaires à la restitution d'une configuration spatiale mémorisée en escalade sportive. 68

IV - Expérience 2 : Effet d'une simulation préalable de la locomotion et incidence de la géométrie du parcours. 95

V - Does mental simulation of following a path improve navigation performance without vision? 141

VI - Bibliographie générale 169

Sommaire détaillé

I - Introduction 8
II - Revue de questions 10
II -1. Quelques précisions sur la notion d'espace 10
II -1.1. Espace et géométrie 10
II -1.2. Espace et développement 11
II -1.3. Modèles neurophysiologiques de l'espace 12
II -1.4. Les référentiels 14
II -2. Déplacer son corps dans l'espace : un problème de navigation 17
II -2.1. Définition 17
II -2.2. La notion de carte cognitive 18
II -2.2.1. Cartes et navigation 18
II -2.2.2. Naviguer sans cartes ? 22
II -2.3. Les différents types de navigation 23
II -2.3.1. Quels indices utiliser pour naviguer ? 23
II -2.3.1.1. La navigation par intégration de trajet (path integration) 24
II -2.3.1.1.1. Un modèle itératif 24
II -2.3.1.1.2. Mise en oeuvre comportementale 25
II -2.3.1.2. La navigation par points de vue 26
II -2.3.2. Quelles stratégies pour naviguer ? 27
II -2.4. Vers une nouvelle classification 28
II -3. Les déplacements du corps entier chez l'homme 31
II -3.1. Déplacements linéaires 31
II -3.2. Rotation du corps 37
II -3.3. Déplacement dans un espace bidimensionnel 39
II -3.3.1. Déplacements par enchaînements de translations et de rotations 40
II -3.3.1.1. Les méthodes de triangulation 40
II -3.3.1.2. La méthode de complétion de trajet (path completion) 41
II -3.3.1.3. Le modèle d'encodage de l'erreur 42
II -3.3.1.4. ... et quelques unes de ses limites 44
II -3.3.2. Déplacements circulaires 45
II -3.3.2.1. Rôle des entrées sensorielles 45
II -3.3.2.2. Orientation par rapport à la trajectoire 47

II -3.3.2.3. Quels modèles pour les déplacements locomoteurs circulaires et elliptiques ? 47
II -3.3.2.3.1. L'approche de la programmation motrice 48
II -3.3.2.3.2. ... et les autres approches 48
II -3.3.2.4. Géométrie et cinématique 49
II -3.3.2.5. Un exemple de loi mouvement : "La loi de puissance 2/3" 50
II -4. Déplacer son corps dans un espace imaginé : un problème d'harmonie entre l'expérience sensible de l'espace et des images mentales 54
II -4.1. Définitions 54
II -4.2. Quelques propriétés des images visuelles 56
II -4.3. Déplacement et images visuelles 57
II -4.3.1. Déplacements linéaires 57
II -4.3.2. Déplacements en rotation 58
II -4.4. Images motrices 62
II -4.4.1. Définitions 62
II -4.4.2. Quels modèles pour l'image motrice ? 63
II -4.4.3. Images motrices et déplacements 64
III - Expérience 1 : Etude préliminaire des indices visuels nécessaires à la restitution d'une configuration spatiale mémorisée en escalade sportive. 68
III -1. Présentation de l'expérience 68
III -1.1. Mémorisation et déplacement du corps 68
III -1.1.1. Les boucles et la mémoire de rappel. 69
III -1.1.2. La mémoire des lieux 69
III -1.1.3. Déformations et fluctuations mnésiques. 70
III -1.2. Mémorisation, geste sportif et environnement 71
III -2. Objectif de l'expérience 73
III -3. Sujets : 74
III -4. Procédure : 74
III -4.1. Présentation des stimuli 74
III -4.1.1. Phase de calibration : 74
III -4.1.2. Phase d'expérimentation : 75
III -4.2. Mode de réponse des sujets. 77
III -5. Variables dépendantes spécifiques à l'expérience 77
III -6. Traitements statistiques 77

III -7. Résultats 78
III -7.1. Résultats de sujets typiques 78
III -7.1.1. Sujet de niveau départemental 78
III -7.2. Condition Trajet Statique Seul 78
III -7.3. Condition Trajet Dynamique Seul 79
III -7.4. Condition Prises Seules 80
III -7.5. Condition Trajet Statique et Prises 81
III -7.6. Condition Trajet Dynamique et Prises 82
III -7.6.1. Sujet de niveau national 83
III -7.7. Condition Trajet Statique Seul 83
III -7.8. Condition Trajet Dynamique Seul 84
III -7.9. Condition Prises Seules 85
III -7.10. Condition Trajet Statique et Prises 86
III -7.11. Condition Trajet Dynamique et Prises 87
III -7.12. Variables temporelles de la réponse des sujets 88
III -7.12.1. Durée moyenne 88
III -7.12.2. Temps d'initiation de la réponse 88
III -7.13. Variables spatiales globales. 89
III -7.13.1. Position relative des barycentres (stimulus / réponse). 89
III -7.13.1.1. Eloignement relatif. 89
III -7.13.1.2. Orientation relative 90
III -7.13.2. Enveloppe convexe de la réponse. 91
III -7.13.2.1. Périmètre de l'enveloppe convexe (Figure III-15-A) 91
III -7.13.2.2. Aire de l'enveloppe convexe 91
III -7.13.3. Variable spatiale locale. 92
III -8. Synthèse et discussion 93
IV - Expérience 2 : Effet d'une simulation préalable de la locomotion et incidence de la géométrie du parcours. 95
IV -1. Présentation de l'expérience 95
IV -2. Méthodes 96
IV -2.1. Dispositifs d'acquisition des données 96
IV -2.1.1. Système de reconstruction des mouvements en 3D 96
IV -2.1.2. Marqueurs portés par les sujets 97
IV -2.1.3. Techniques de datation des événements 97

IV -2.2. Variables mesurées 97
IV -2.2.1. Erreurs locales à chaque cible 97
IV -2.2.2. Analyse spatiale de portions de trajets 98
IV -2.2.3. Espace exploré lors du déplacement 99
IV -2.2.4. Durée du trajet 100
IV -2.3. Traitements statistiques 100
IV -2.3.1. Traitement des données linéaires 100
IV -2.3.2. Traitement des données angulaires 100
IV -2.4. Formes des trajets locomoteurs 101
IV -2.5. Sujets 102
IV -2.6. Procédure 103
IV -2.6.1. Phase d'observation 104
IV -2.6.2. Phase d'apprentissage 104
IV -2.6.3. Phase de marche 105
IV -2.7. Variables dépendantes spécifiques à l'expérience 106
IV -2.8. Résultats 107
IV -2.8.1. Trajets reproduits par les sujets 107
IV -2.8.2. Déformation globale des trajets 109
IV -2.8.2.1. Coefficient de corrélation 109
IV -2.8.2.2. Erreur quadratique moyenne (cm) 110
IV -2.8.2.3. Décomposition de l'ajustement 111
IV -2.8.2.3.1. Translation du centre de gravité des coins imaginés 111
IV -2.8.2.3.2. Rotation 114
IV -2.8.2.3.3. Homothétie 115
IV -2.8.3. Analyse spatiale de portions de trajets 115
IV -2.8.3.1. Erreur de corde (%) 115
IV -2.8.3.1.1. Erreur de corde totale (%) 115
IV -2.8.3.1.2. Erreur de corde par côté (%) 116
IV -2.8.3.2. Erreur d'angle (%) 117
IV -2.8.3.2.1. Erreur d'angle totale (%) 117
IV -2.8.3.2.2. Erreur d'angle par coin (%) 117
IV -2.8.4. Espace des erreurs 118
IV -2.8.5. Erreurs locales à chaque cible 120
IV -2.8.5.1. Eloignement par rapport à la cible (m) 120

IV -2.8.5.2. Orientation du déplacement (°) 121
IV -2.8.6. Espace exploré lors du déplacement 124
IV -2.8.7. Durée du trajet 125
IV -2.8.7.1. Données brutes 125
IV -2.8.7.2. Corrélation temps de marche *vs* temps mental lors de l'apprentissage 127
IV -2.9. Synthèse et discussion 130
IV -2.9.1. La simulation est-elle plus efficace que le repos (G1 et G2 *vs* G4) ... 130
IV -2.9.1.1. ... du point de vue du respect de la forme du modèle ? 130
IV -2.9.1.2. ... pour la reproduction de la corde et des angles et pour la précision par rapport à chaque cible ? 130
IV -2.9.1.3. ... du point de vue temporel ? 131
IV -2.9.2. La simulation est-elle plus efficace que le mouvement réel (G1 et G2 *vs* G3) ... 131
IV -2.9.2.1. ... du point de vue du respect de la forme du modèle ? 131
IV -2.9.2.2. ... pour la reproduction de la corde et des angles et pour la précision par rapport à chaque cible ? 132
IV -2.9.2.3. ... du point de vue temporel ? 132
IV -2.9.3. La reproduction mémorisée est-elle plus efficace que le mouvement réel (G5 *vs* G3) 132
IV -2.9.3.1. ... du point de vue du respect de la forme du modèle ? 133
IV -2.9.3.2. ... pour la reproduction de la corde et des angles et pour la précision par rapport à chaque cible ? 133
IV -2.9.3.3. ... du point de vue temporel ? 133
IV -2.9.4. La simulation est-elle plus efficace que la reproduction mémorisée (G1 et G2 *vs* G5) 134
IV -2.9.4.1. ... du point de vue du respect de la forme du modèle ? 134
IV -2.9.4.2. ... pour la reproduction de la corde et des angles et pour la précision par rapport à chaque cible ? 134
IV -2.9.4.3. ... du point de vue temporel ? 134
IV -2.9.5. Le sujet traite-t-il séparément les angles et les distances ? 135
IV -2.9.6. Quel est l'effet de la géométrie 136
IV -2.9.6.1. ... du point de vue du respect de la forme du modèle ? 136

IV -2.9.6.2. ... pour la reproduction de la corde et des angles et pour la précision par rapport à chaque cible ? 137
IV -2.9.6.3. ... du point de vue temporel ? 138
IV -2.10. Résumé et conclusion 139
V - Does mental simulation of following a path improve navigation performance without vision? 141
V -1. Introduction 144
V -2. Material and methods 148
V -2.1. Subjects 148
V -2.2. Task and procedure 148
V -2.3. Data acquisition and analysis 151
V -3. Results 153
V -4. Discussion 156
VI - Bibliographie générale 169

I - Introduction

La locomotion considérée comme l'activité de déplacement du corps d'un point de l'espace à un autre est une activité fonctionnelle qui permet aux animaux d'assurer leur survie. Elle facilite l'atteinte de ressources alimentaires, la prédation ou le retour au gîte. Chez l'homme, même lorsque les modes de vie modernes diminuent les contraintes liées à la survie alimentaire de l'individu, les besoins de locomotion restent importants. En particulier se déplacer avec précision reste vital. En effet, lorsqu'il s'agit de patienter sur le bord d'un trottoir avant de traverser une rue, il est évident que le point d'arrêt doit se situer en dehors de la chaussée. De même pour se déplacer dans les couloirs d'un grand immeuble, il est nécessaire de tenir compte de la position des intersections pour changer de direction et prendre un nouveau couloir. Ces déplacements très fréquents sont considérés comme naturels. Pourtant ils nécessitent de mettre en correspondance différents types d'informations sur l'espace environnant, l'état du corps qui se déplace et sa propre position dans l'environnement. Certaines pathologies de la perception de l'espace ou certaines contraintes sur la réalisation des trajets nous rappellent que ces comportements restent d'une extrême complexité. Par exemple, les activités sportives ou artistiques fournissent une multitude de déplacements fortement contraints qu'il est difficile de reproduire sans une pratique intensive. La forme géométrique de ces déplacements locomoteurs complexes est régie par des contraintes environnementales (escalade, slalom de ski), esthétiques (danse, gymnastique), mécaniques (course d'élan du sauteur en hauteur) ou réglementaires. Ces contraintes contribuent à la constitution explicite ou implicite d'un modèle géométrique que le sujet aura pour charge de reproduire.

Si l'on considère le déplacement comme la production d'une trajectoire du corps ayant une forme optimale en rapport avec certaines contraintes environnementales, la question se pose alors de savoir dans quelle mesure des modèles de trajectoires peuvent être reproduits par des sujets humains lors de la locomotion. L'objectif de ce travail est de mettre à jour quelques mécanismes d'ajustement de la forme des trajets locomoteurs par rapport à la forme des trajets proposés et de contribuer ainsi à mieux cerner les mécanismes de navigation dans l'espace bidimensionnel. Ce problème est en liaison étroite avec des données actuelles issues des sciences cognitives en général (psychologie, neurosciences, etc.) et trouve des applications certaines dans les activités physiques et artistiques qui nécessitent un guidage et un contrôle précis de la trajectoire du corps entier dans l'environnement. C'est évidemment le cas en escalade rocheuse ou sportive.

Dans un premier temps nous nous concentrerons sur les données de la littérature qui représentent un support pour notre compréhension de la géométrie des trajets locomoteurs. Nous procéderons en quatre étapes. Nous passerons en revue certaines conceptions de la notion d'espace et insisterons sur le rôle de l'expérience sensible du sujet. Nous montrerons que le fait de déplacer son corps entier dans l'espace est un problème de navigation qui peut être résolu selon différentes stratégies. Nous déboucherons ensuite, chez l'homme, sur la production de trajets locomoteurs en envisageant certains modes de contrôle pour les trajets linéaires, en rotation ou dans l'espace bidimensionnel. Enfin, nous analyserons les interactions entre les déplacements locomoteurs et les images mentales formées par le sujet qui les réalise.

Après ce chapitre théorique, nous consacrerons deux chapitres à l'exposé du travail expérimental.

Le premier sera très clairement consacré à la détermination des indices visuels nécessaires à la restitution fidèle d'un environnement mémorisé en escalade sportive (position des prises dans la voie). Cette question, constitue un point essentiel, en particulier lorsqu'il s'agit d'analyser une voie et d'en estimer la difficulté avant de grimper ou en phase d'isolement.

Le second chapitre sera consacré à l'étude des mécanismes d'apprentissage de la forme du trajet et du rôle de sa géométrie. Dans une tâche de marche sur un trajet hexagonal, nous chercherons à identifier les incidences d'une activité préalable de simulation du déplacement sur la précision de la reproduction. De plus nous chercherons à clarifier la question du traitement par le sujet des aspects géométriques du modèle en effectuant certaines modifications spécifiques des angles et des distances.

Enfin, nous reprendrons le texte d'un article scientifique actuellement sous presse pour la revue "Cognitive Brain Research". Cet article expose, de façon synthétique, l'intérêt de la simulation mentale de trajets locomoteurs préalablement observés pour pouvoir en restituer fidèlement la forme.

Des discussions sont présentées en fin de chapitre. Elles synthétisent les principaux résultats obtenus, relient notre contribution expérimentale avec les connaissances actuelles sur les déplacements locomoteurs et tracent quelques perspectives concernant le contrôle des trajectoires locomotrices en liaison avec la perception de l'espace et les contraintes motrices et cognitives auxquelles le sujet doit faire face lors de ses déplacements.

II - Revue de questions

II -1. Quelques précisions sur la notion d'espace

II -1.1.Espace et géométrie

Notre appréhension de l'espace physique est liée à l'expérience sensori-motrice que nous construisons par une interaction permanente avec les objets qui nous entourent et à des constructions plus formelles de ces relations complexes. Un des buts de ces constructions symboliques dont la géométrie euclidienne est l'exemple le plus connu est de structurer l'espace environnant afin de lui donner une certaine cohérence. Le passage d'une multitude d'espaces sensoriels et moteurs à la constitution d'un espace unique et cohérent pour le sujet s'opère par un ensemble d'opérations complexes qui permettent une réduction drastique de la complexité computationnelle lors de la réalisation d'une perception ou d'une action.

En fait, la question qui se pose est celle du rapport entre construction géométrique conceptuelle telle que les mathématiques ont pu en proposer au cours de leur histoire et perception ou simulation mentale des espaces physiques et des mouvements des organismes vivant dans ces espaces. Il s'agit donc des rapports entre géométrie mathématique et géométrie du monde sensible. Cette question a été abordée très différemment au cours des siècles mais nous retiendrons que deux tendances radicalement opposées se sont affrontées au cours du XX° siècle. Il s'agit de l'opposition entre un courant défendu par Rieman et Poincaré qui insiste sur le rôle de l'espace et sur la constitution de concepts mathématiques par l'homme en tant qu'être vivant et un courant dont Hilbert fut le représentant en créant un système de règles logiques universelles dont l'objectif était de dissocier complètement les mathématiques de l'homme et de son expérience sensible.

Nous porterons notre attention sur les théories de l'espace centrées sur l'expérience de l'homme en mouvement. Pour Poincaré, le point géométrique est défini comme "la suite des mouvements qu'il convient de faire pour l'atteindre à partir d'une position initiale du corps" (Poincaré, 1930). Cela signifie que des mouvements orientés vers des buts proches ou lointains sont à la base des fondements de la géométrie et que la notion d'espace absolu ne peut exister puisque l'espace est une construction issue des mouvements singuliers produits par chaque individu. Par conséquent, "lorsque nous localisons tel ou tel objet dans l'espace ... cela signifie simplement que nous nous représentons les mouvements qu'il faut faire pour atteindre cet objet" (Poincaré, 1968 - p. 82). Mais Poincaré (p. 82-83) a recours à la distinction entre "changement de position" et "changement d'état". Les "changements de

position" permettent au sujet de faire la différence entre les modifications effectuées volontairement en réponse à des changements d'origine externe de ses sensations. Les "changements d'état" définissent les changements de sensations que le sujet ne peut pas compenser par une modification de son état interne. Dans un cas nous sommes en présence de "déplacements du corps en bloc" alors qu'il s'agit dans l'autre cas de "changements d'attitude" (Poincaré, 1970 - p. 79). Le mouvement serait donc indispensable car il permet d'acquérir la notion d'espace.

Les sensations musculaires qui accompagnent ces mouvements n'ont aucun caractère géométrique a priori. C'est pourquoi cette position conduit Poincaré à distinguer radicalement l'espace géométrique de l'espace sensible (ou "représentatif") et à chercher l'origine de cet espace géométrique qui ne peut s'imposer de fait à notre esprit sans recourir à la notion de sensation. Il considère en parlant de l'espace géométrique "qu'aucune de nos sensations, isolée, n'aurait pu nous conduire à l'idée de l'espace, nous y sommes amenés seulement en étudiant les lois suivant lesquelles ces sensations se succèdent" (p. 83). En fait, les déformations des objets perçues lors de nos déplacements propres nous permettent de nous situer par rapport à eux et de prendre conscience de leur état solide dans un espace empreint de certaines régularités. Ces régularités sont exprimées par des géométries qui nous permettent d'appréhender la cohérence du monde physique qui nous entoure. Cependant le choix de la géométrie euclidienne s'est lentement imposé car c'est la plus avantageuse pour notre espèce. En fait, selon Poincaré cette géométrie n'est pas "vraie" mais elle est commode (p. 94). Ceci se vérifie pour la plupart d'entre nous dans nos activités quotidiennes mais ce n'est pas toujours le cas. Prenons l'exemple du passager et du pilote d'un avion transatlantique. Alors que le passager est assis dans l'avion, son espace est un espace euclidien même s'il perçoit par le hublot une très petite portion du globe terrestre. Ce n'est pas le cas du pilote dont la tâche principale est de mener l'avion à bon port en suivant de grandes trajectoires circulaires autour de la terre. Comme quelques professionnels des déplacements à très grande échelle, il est dans l'espace sphérique d'une géométrie Riemannienne. Compte tenu des échelles et des vitesses de déplacement lors de nos expériences le recours à des géométries non Euclidiennes ne serait pas justifié. Par conséquent, nous nous référerons à la géométrie Euclidienne à partir de maintenant.

II -1.2.Espace et développement

Au plan psychologique, l'adulte est capable d'appréhender l'espace qui l'entoure comme un tout cohérent dans lequel il coordonne ses actions. L'enfant est davantage tributaire

des outils cognitifs dont il dispose à chaque stade de son développement pour élaborer progressivement une image spatiale "dont la forme symbolisante tend à un isomorphisme réel avec le contenu symbolisé" (Piaget & Inhelder, 1966). Cette image est intégrée dans un modèle d'organisation de la représentation de l'espace basé sur une analyse empirique de l'ontogenèse de la perception spatiale. Bien que les substitutions hiérarchiques qui organisent ce modèle soient actuellement discutées, il permet par "assimilation" et "accommodation" de construire une représentation la plus fidèle possible du monde réel. Deux opérations distinctes permettent de construire progressivement les rapports spatiaux. Il s'agit d'une part de coordonner les relations géométriques qu'entretiennent les différentes portions de l'espace pour passer de la prise en compte de parcelles locales à celle d'éléments de l'espace aussi bien proches que lointains. D'autre part, il s'agit d'évoluer d'un "égocentrisme" marqué vers une perspective "exocentrée". Dans le premier cas l'enfant ne peut envisager d'autre perspective que la sienne propre et d'autres relations spatiales que celles qui l'engagent lui-même. Dans le second, il se décentre de l'espace environnant et se considère d'un point de vue extérieur comme un des objets qui composent l'espace. Cette évolution se déroule lors de l'enfance et Piaget distingue trois phases successives : la topologie, la géométrie projective et la géométrie euclidienne.

L'espace topologique est le premier qui se met en place dans les quatre premiers mois de l'enfant. Il lui permet de construire les relations de voisinage, de séparation, d'ordre, d'enveloppement et de continuité. Cependant ce type de relations ne lui permet pas encore d'accéder aux notions de distances et d'angles.

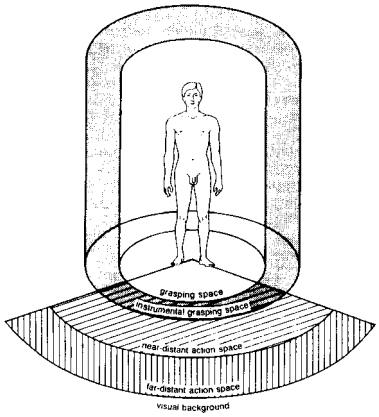
La confrontation des points de vue (le sien propre et celui obtenu depuis d'autres objets) est caractéristique des relations dans "l'espace projectif" vers lequel le sujet évolue pour construire "l'espace euclidien". Lors de ces deux derniers stades qui se déroulent simultanément, l'enfant est en mesure d'envisager des relations d'ensemble entre les objets et de donner une évaluation quantitative de ces relations. Il peut alors appréhender, grâce à des systèmes d'axes et de coordonnées, les notions de distance et d'angle ainsi que leur éventuelle conservation lors de transformations euclidiennes.

II -1.3.Modèles neurophysiologiques de l'espace

La segmentation de l'espace tridimensionnel en plusieurs domaines a été modélisée d'un point de vue neurophysiologique et comportemental. Au plan neurophysiologique, Previc (1990) propose de s'appuyer sur les zones fonctionnelles du champ visuel pour distinguer le domaine "péri personnel" (proche du sujet) dans lequel se déroulent les actions de capture

visuelle, et la manipulation d'un domaine "extra personnel focal" plus lointain, dédié à la recherche visuelle et la reconnaissance d'objets. Ce premier modèle a été complété (Previc, 1993) par l'introduction d'un domaine "extra personnel ambiant" qui concerne l'orientation spatiale et le contrôle de la posture lors de la locomotion. D'autres modèles (Rizzolatti & Camarda, 1987; Grusser, 1983) s'appuient sur des données neurophysiologiques pour diviser l'espace en trois (espace personnel, espace péri personnel et espace lointain) ou quatre parties (espace de saisie, espace proche d'action, espace lointain d'action et arrière plan visuel).

A



B

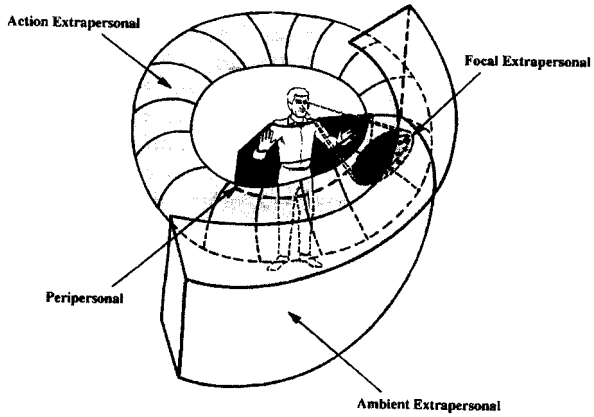


Figure II-1 : Modèles de l'espace A) de Grusser (1983) et B) de Previc (1998).

Au plan comportemental, Cutting et Vishton (1995) proposent une distinction quantitative des portions de l'espace. Ils considèrent un espace personnel dans un rayon de deux mètres autour du sujet, un espace d'action qui peut aller jusqu'à trente mètres et un espace panoramique. Un modèle synthétique est avancé par Previc (1998). Il vise à faire l'amalgame entre les données neurophysiologiques et comportementales. Pour cela, l'auteur s'appuie sur la notion d'espace "extra personnel d'action" qui vient compléter son modèle de 1993 et qui correspond à la zone d'orientation et de mémoire topologiques dans laquelle la navigation peut commencer à s'opérer (Figure II-1). Bien que ces quatre systèmes comportementaux diffèrent par leur rôle fonctionnel, les régions de l'espace 3D qu'ils recouvrent et les systèmes sensoriels et moteurs préférentiellement mis en jeu, ils sont utilisés en synergie. Une organisation hiérarchique est proposée par l'auteur pour que des positions spatiales codées dans un système de coordonnées spécifiques à un espace donné (par exemple la position du corps dans l'espace "extra personnel ambiant") puissent être retrouvées dans un autre espace muni d'un système différent (par exemple la position du tronc dans l'espace "extra personnel d'action").

Ces différents travaux mettent en évidence la notion d'interaction entre de multiples représentations cérébrales de l'espace. En fait, il ne s'agirait pas de *l'espace* mais *d'espaces*. L'espace dans lequel nous planifions et exécutons nos actions quotidiennes ne serait pas un espace absolu mais au contraire un ensemble d'espaces ayant chacun un caractère partiel et approximatif (Arbib, 1991). Chacun de ces espaces correspond à un sous ensemble de l'espace. Ils sont relatifs à une action ou une série d'actions spatialement limitées comme l'atteinte manuelle ou locomotrice d'un objet, sa visualisation, voire même à des représentations allocentriques ou cognitives. Leur précision et leur fiabilité sont également en rapport avec l'échantillonnage sensoriel. De ce fait, l'auteur suggère que la combinaison de ces représentations des espaces structure notre comportement spatial. Ce phénomène permet d'inclure dans des cartes des portions plus vastes de notre territoire si elles sont pertinentes par rapport à l'action à réaliser, et d'effectuer une calibration mutuelle des différents espaces afin d'améliorer la précision de la représentation d'ensemble par rapport à la représentation des sous espaces.

Nous reconnaissons des différences fonctionnelles et perceptives mais dans le cadre d'une classification basée sur la notion de représentation cognitive de l'espace, certains auteurs insistent sur le caractère schématique des constructions mentales des éléments saillants de l'espace et de leurs relations mutuelles. Le principe de schématisation est à la base de formalisations linguistiques d'un discours spatial (Denis, 1997; Denis, Pazzaglia, Cornoldi, & Bertolo, 1999) ou picturales lorsqu'il s'agit de produire une information géographique sous forme de cartes (Mark, Freksa, Hirtle, Lloyd, & Tversky, 1999). Mais qu'il s'agisse de "l'espace du corps", de "l'espace autour du corps" ou de "l'espace de la navigation", Tversky et al. (1999) considèrent que "l'espace est toujours le même pour la géométrie alors que pour les gens, différents espaces font l'objet de perceptions, d'interactions et de schématisations différentes".

II -1.4.Les référentiels

En fait, un des problèmes majeurs auquel fait référence la remarque de Tversky et al. (1999) est celui des référentiels spatiaux. Il s'agit de déterminer si un sujet en déplacement dans l'espace identifie sa relation à l'environnement par rapport à sa propre position ou s'il est capable de s'orienter indépendamment de celle-ci. Dans le premier cas, le référentiel est *égocentrique* ou *subjectif*, c'est-à-dire que la relation à l'environnement va être modifiée dès que le sujet va se mouvoir. Inversement on parlera de référentiel *allocentrique* ou *objectif*

pour indiquer que les déplacements du sujet n'affectent pas sa représentation de l'espace (Figure II-2).

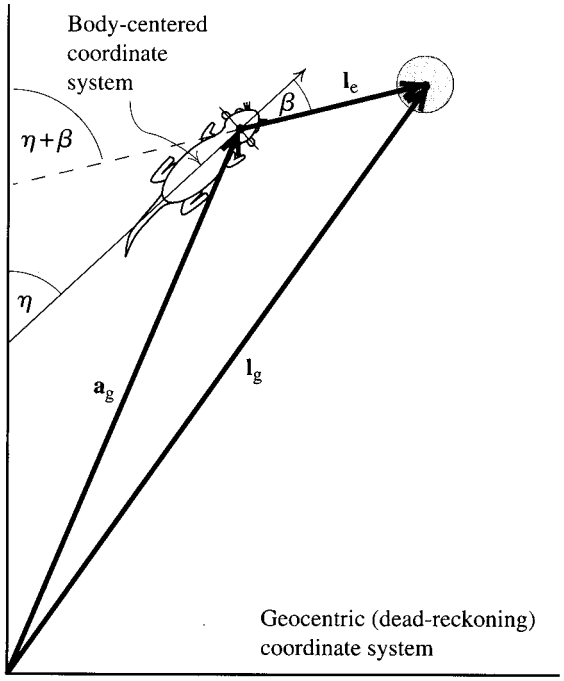


Figure II-2 : Distinction entre un référentiel centré sur le sujet ou un référentiel centré sur son environnement lors d'une tâche de navigation (Gallistel & Cramer, 1996).

Cette distinction classique est illustrée par le sentiment de confusion que peut éprouver un sujet lorsqu'il est plongé dans un environnement visuel en mouvement. Lorsque la scène visuelle se déplace de façon linéaire ou circulaire, la perception résultante est ambiguë : le sujet peut soit avoir la sensation que l'environnement se déplace par rapport à son corps immobile, soit avoir la sensation que son corps se déplace dans un environnement fixe. Ces référentiels sont probablement d'origine géocentrique et partagent des caractéristiques liées à la direction de la gravité (Paillard, 1971) mais il est possible que cette distinction soit quelque peu restrictive. En effet, il a été montré qu'ils sont hiérarchiquement organisés en référence à des modalités sensorielles (Berthoz, 1991). Ils peuvent également être partiels et liés à la nature de la tâche à réaliser (Soechting & Flanders, 1989; Soechting & Flanders, 1994; McIntyre, Stratta, & Lacquatini, 1998; McIntyre, Stratta, & Lacquaniti, 1997). Dans le domaine des déplacements locomoteurs du corps dans l'espace bidimensionnel, Benhamou (1997a pour une revue) et Benhamou et al. (1996) ont confirmé la possibilité d'un recours à plusieurs référentiels. Par exemple, une référence égocentrée relative pourrait être utilisée afin de permettre au sujet de mettre à jour de façon dynamique la position des objets qui l'entourent au cours même de son déplacement. Sauvé (1989) a formalisé et testé chez

l'homme un modèle de mémorisation spatiale dynamique égocentrée dans lequel le sujet réactualise le codage vectoriel de la localisation des points de l'espace par un traitement égocentré des informations de mouvement générées par son déplacement.

Dans la suite de cette étude nous nous intéresserons principalement à l'espace de déambulation c'est-à-dire l'espace (bidimensionnel) dans lequel s'effectuent les déplacements du corps dans son entier par opposition à l'espace de la manipulation qui, lui, peut avoir une, deux ou trois dimensions et dans lequel il s'agit essentiellement de déplacer les segments du corps les uns par rapport aux autres (par exemple pour atteindre ou saisir un objet depuis une posture assise).

II -2. Déplacer son corps dans l'espace : un problème de navigation

II -2.1.Définition

Le terme "navigation" provient du latin navis (navire) et agere (conduire). Cette habileté très ancienne dans l'histoire de l'humanité signifiait donc "conduire un navire" c'est-à-dire le diriger et manoeuvrer les voiles de façon appropriée (Figure II-3). Aujourd'hui la navigation ne se restreint plus au domaine maritime. Actuellement le terme navigation fait référence à la pratique ou à l'habileté d'animaux ou d'humains à se déplacer d'un lieu à un autre. Dans ce cas le mode de déplacement utilisé peut être varié (marche, reptation, course, nage, canotage, etc.) et il est possible de parler de navigation pour qualifier une activité maritime, aérienne ou terrestre y compris dans le cas où des dispositifs techniques sont utilisés pour accomplir ce déplacement. Cette activité requiert une connaissance de sa propre position, de la position du but à atteindre, des chemins que l'on pourrait emprunter ainsi que de la progression réalisée en cours de déplacement (Able, 1989).

Bien qu'elle puisse se définir très clairement d'un point de vue géométrique, une tâche de navigation spécifique peut reposer sur la prise en compte et le traitement d'un grand nombre d'informations. Elles proviennent d'une multitude de capteurs sensoriels, de la mémoire et de connaissances issues des expériences passées du sujet. Chez l'homme, la navigation pourrait également nécessiter de mettre à jour sa propre position et son orientation pendant le déplacement, de former et d'utiliser des représentations de l'environnement dans lequel le trajet vient s'inscrire et de planifier la (les) route (s) à prendre en fonction de contraintes qui peuvent être variables (prendre le plus court chemin, effectuer le trajet le plus rapidement possible, effectuer le trajet en minimisant le coût énergétique, etc.).



Figure II-3 : Les voiliers font parti d'un vaste ensemble de dispositifs destinés à la navigation mais naviguer n'implique pas forcément d'utiliser de tels dispositifs.

Pour Gallistel (1990), "la navigation est le processus de détermination et de maintien d'une route ou d'une trajectoire d'un lieu à un autre. Pour cela, les mécanismes d'estimation de sa propre position par rapport à un monde connu sont fondamentaux. Le monde connu est composé de surfaces dont les positions relatives les unes par rapport aux autres sont représentées sur une carte". Il apparaît dans cette perspective que le monde physique i) doit être représenté et ii) que cette représentation peut être comparée à une carte.

II -2.2.La notion de carte cognitive

II -2.2.1.Cartes et navigation

En ce qui concerne l'analyse des mécanismes d'orientation spatiale, la notion de carte cognitive (Tolman, 1948) initialement avancée à titre d'hypothèse chez le rat est largement utilisée pour rendre compte d'une construction symbolique censée restituer de la façon la plus fidèle possible les caractéristiques de l'espace dans lequel le sujet navigue. Pour l'auteur, "lors de l'apprentissage, quelque chose comme un champ cartographié de l'environnement s'établit dans le cerveau du rat" et les relations spatiales entre des indices environnementaux pertinents utilisés par l'animal pourraient y être stockées lorsqu'il est amené à choisir son chemin en fonction du but à atteindre. De plus, l'auteur indique que ces cartes cognitives peuvent fournir une représentation plus ou moins précise et parcellaire de l'espace. Ainsi, l'animal ne sera pas en mesure d'adapter son comportement et de changer de trajet pour prendre en compte toute modification des éléments de l'espace environnant s'il dispose d'une carte cognitive trop restreinte. A l'inverse, une carte cognitive plus large lui ouvrira des possibilités de modulation de son trajet et d'atteinte de son but pour répondre aux nouvelles caractéristiques de l'environnement. La capacité d'utiliser des raccourcis ou de faire des détours pour se rendre d'un point de l'espace à un autre serait fortement liée à une représentation de l'espace sous la forme de carte cognitive.

D'après Gallistel (1990) une carte cognitive est "un enregistrement au niveau du système nerveux central des relations géométriques macroscopiques entre les surfaces de l'environnement utilisées pour planifier le déplacement". De ce fait, cet auteur s'interroge sur la nature des relations géométriques qui sont encodées sur une carte cognitive. Mais la notion de carte cognitive s'apparente essentiellement à la façon dont l'espace est représenté. Or comme tous les animaux possèdent une représentation de l'espace, on pourrait en conclure en suivant la définition donnée de la notion de carte cognitive que tous les animaux naviguent en utilisant des cartes cognitives.

O'Keefe et Nadel (1978) ont détaillé la capacité des rats à prendre des raccourcis. Utilisant des caractéristiques qu'ils pensent pouvoir être utilisées par l'homme lors de tâches de navigation terrestre, ils proposent que la notion de route est une alternative plus simple que celle de carte cognitive. Dans ce modèle, les buts sont toujours des balises (ou sont très proches d'elles) de telle sorte que l'animal peut les atteindre en se dirigeant directement vers les balises. En utilisant cette stratégie de route un animal pourrait, en se dirigeant de proche en proche vers une série de balises successives préalablement mémorisées effectuer des trajets sur des distances importantes. Mais du fait qu'une route conduit à produire une trajectoire très peu flexible, la modification de la série de balises (par déplacement, permutation ou destruction) entraîne un arrêt de la progression de l'animal vers son but. Par opposition, un animal utilisant une carte cognitive, par nature très flexible et résistante à la destruction d'une partie des balises de parcours, peut atteindre son but en utilisant des trajets différents. D'un point de vue calculatoire, les cartes cognitives contiendraient une quantité d'information plus importante sur l'environnement que les routes et par conséquent la navigation par carte cognitive serait plus lente du fait des exigences de calculs plus complexes. Selon O'Keefe et Nadel (1978) les propriétés des cartes ("locale") et des routes ("taxon") sont différentes en particulier pour leur apprentissage et leur mémorisation. L'apprentissage des trajets serait effectué en "tout ou rien" pour les routes alors qu'il serait graduel pour les cartes cognitives. Les auteurs suggèrent que c'est justement la capacité à trouver de nouveaux raccourcis qui distingue les comportements des animaux utilisant des cartes cognitives de ceux utilisant des routes.

Cependant, la notion de cartes cognitives est discutée. Bennet (1996) remet en cause leur existence chez certaines espèces animales et chez l'homme. Cet auteur identifie plusieurs acceptions de la notion de "carte cognitive" et souligne qu'elles recouvrent une large variété de comportements spatiaux. Alors qu'une carte cognitive au sens de Tolman, O'Keefe et Nadel est une puissante représentation de l'espace dont l'existence est montrée par la capacité de l'animal à trouver de nouveaux raccourcis, toute représentation de l'espace est une carte cognitive au sens de Gallistel. Il en résulte qu'une route au sens de Tolman, O'Keefe et Nadel est une carte cognitive au sens de Gallistel.

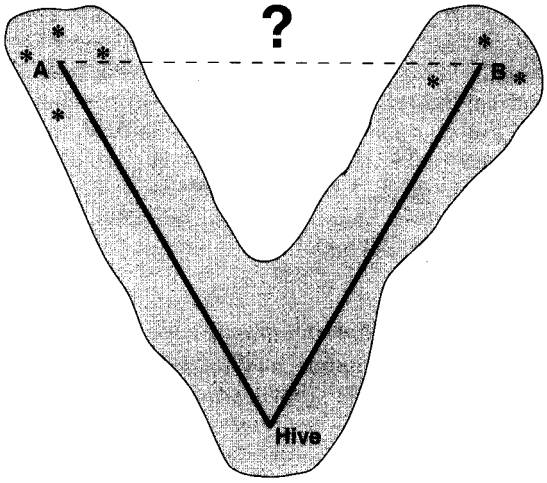


Figure II-4 : Connaissant les lieux A et B, appris indépendamment l'un de l'autre, il reste difficile de certifier l'impossibilité de reconnaître l'un des lieux depuis l'autre lieu (Bennett, 1996).

De plus, Bennet (1996) rappelle qu'on peut envisager des solutions plus simples que les cartes cognitives pour expliquer la création de nouveaux raccourcis chez certaines espèces animales. Pour conclure à l'existence de cartes cognitives, plusieurs précautions expérimentales sont nécessaires. En premier lieu, un raccourci est nouveau à la condition que l'animal n'ait jamais eu l'occasion d'acquérir une connaissance des lieux au préalable. Cette condition est rarement contrôlée dans les protocoles impliquant des animaux sauvages. Ensuite, la capacité d'intégrer (au sens mathématique du terme) les distances et les directions sur la base de signaux issus des flux visuel ou vestibulaire peut permettre le retour direct au point de départ. Dans ce cas les mécanismes impliqués ne nécessitent pas le recours à la position de cibles préalablement mémorisées. Enfin, dans une tâche de raccourci (entre les deux branches d'un trajet en forme de V par exemple) il reste possible que des balises connues soient reconnues depuis de nouveaux points de vue éliminant ainsi le caractère nouveau du trajet à effectuer pour les rejoindre (Figure II-4).

Du fait de l'absence de vérification simultanée de ces trois critères dans les études expérimentales sur la capacité des animaux à trouver de nouveaux raccourcis, Bennett (1996) affirme "qu'aucune espèce animale ne possède de carte cognitive au sens de Tolman, O'Keefe et Nadel". Cependant, le recours conjoint à des mécanismes d'intégration de trajet et d'utilisation de balises est utilisé par certaines espèces comme les abeilles, les fourmis du désert et les rongeurs (Etienne, Maurer, Georgakopoulos, & Griffin, 1999; Collett, Collett, & Wehner, 1999) ce qui n'exclut pas l'utilisation des caractéristiques de vues locales extraites depuis des points de vue distincts (Judd, Dale, & Collett, 1999; Judd & Collett, 1998), de

compas solaires ou célestes (Wiltschko & Wiltschko, 1999) ou d'informations d'origine olfactive (Wiltschko, 1996) ou magnétique (Wiltschko & Wiltschko, 1996; Wiltschko, Munro, Ford, & Wiltschko, 1998) pour s'orienter.

En fait, Thinus-Blanc et Gaunet (1999) proposent de redéfinir la notion de carte cognitive qui est considérée classiquement comme un système de représentations internes de l'environnement où les lieux et leurs relations mutuelles (directions et distances) seraient "tracés". En effet, le terme cognitif fait référence à un processus dynamique d'élaboration et d'utilisation des connaissances spatiales alors que celui de carte renvoie classiquement à une représentation de la réalité qui, sans aller jusqu'à l'isomorphisme, suppose une certaine fidélité et correspond au résultat de ce processus, c'est-à-dire à une image statique du monde réel (Thinus-Blanc, 1983 - p. 30). Pour ces auteurs les représentations spatiales possèdent une double fonction. Elles servent à s'orienter dans un environnement donné mais elles servent également à "rassembler et structurer les nouvelles informations" ce qui nécessite un niveau d'abstraction compatible avec la génération de règles (par exemple géométriques) suffisamment générales pour s'adapter à de nouveaux environnements. Des expériences de déshabituation ont été menées sur des rongeurs. L'activité exploratoire plus longue quand la forme d'une configuration d'objets est modifiée que lorsqu'elle est préservée par un effet de zoom, a montré la capacité des animaux à catégoriser l'espace et à former des représentations relativement abstraites. L'absence de régularité dans les trajets exploratoires des rongeurs après la modification des paramètres de l'environnement semble indiquer que les multiples allers et retours ont une fonction secondaire qui consiste à éviter de répéter des trajets déjà utilisés (Thinus-Blanc & Gaunet, 1999). Le même type de paradigme a été utilisé chez l'homme dans l'espace de navigation (Gaunet & Thinus-Blanc, 1996) et dans l'espace de manipulation (Gaunet, Martinez, & Thinus-Blanc, 1997). L'enregistrement de l'activité exploratoire des configurations d'objets pour détecter d'éventuels changements introduits par l'expérimentateur après une phase d'observation a mis en évidence deux types de stratégies. La stratégie cyclique consiste à visiter successivement tous les objets de l'environnement pour finir avec le premier d'entre eux. La stratégie de va-et-vient consiste à rallier de façon répétée deux objets. Ces deux stratégies peuvent se retrouver chez des sujets dont l'expérience visuelle de l'environnement est variée (aveugles de naissance, cécité récente ou sujets avec les yeux bandés). Cependant les résultats indiquent que la stratégie cyclique est davantage utilisée par les aveugles récents dont le niveau de performance reste plus faible alors que les autres sujets privilégient les va-et-vient. Ils indiquent également que la performance est corrélée au nombre de contacts pour chaque stratégie c'est-à-dire que les bons résultats sont plus

fréquents lorsque la stratégie de va-et-vient est utilisée. Ces analyses conduisent leurs auteurs à postuler que "la précision des représentations, reflétée par le niveau de performance, dépend des moyens mis en oeuvre pour les construire" (Thinus-Blanc et al., 1999).

La notion de cartes cognitives présente un intérêt manifeste mais soulève par ailleurs différentes questions théoriques du point de vue de leur fonction, des actions réalisées par les sujets qui les utilisent et de leur analogie incertaine avec les cartes de type géographiques. D'autres métaphores ont été proposées pour la représentation et le traitement de connaissances spatiales. Kuipers (1982) fait référence à un "atlas cognitif" qui serait en fait une collection de cartes cognitives d'échelles probablement différentes et comportant des trous de sorte que l'espace représenté serait non homogène. Cependant, les cartes cognitives pourrait être des "figures impossibles" et la notion de "collage cognitif" (Tversky, 1993) a été avancée pour insister sur le fait que les représentations mentales qui guident les jugements lorsqu'il s'agit de trouver son chemin, sont des constructions multimédia fragmentées et partielles. A ce titre les connaissances spatiales n'auraient pas les mêmes qualités métriques que les cartes. Cette propriété semble se vérifier sur de grands espaces (Figure II-5) y compris quand les sujets sont des professionnels du déplacement (Giraudo & Pailhous, 1994; Pailhous, 1970).

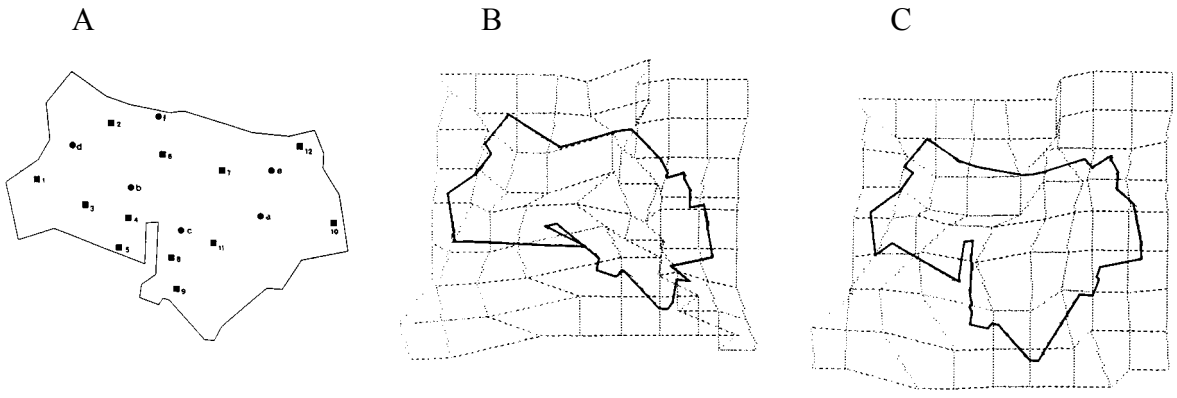


Figure II-5 : Après avoir appris la carte de leur ville natale (A), les sujets ont replacé les monuments typiques. Après traitement, la carte imaginée par deux sujets (B et C) a été recomposée. Il apparaît clairement des déformations de la reproduction par rapport à la carte d'origine (Giraudo et al., 1994).

II -2.2.2.Naviguer sans cartes ?

La nature psycho-biologique de ces cartes est fortement discutée et une définition plus fonctionnelle de la navigation semble nécessaire (Trullier, Wiener, Berthoz, & Meyer, 1997). Selon les auteurs, cela est possible en apportant quelques nuances à des questions préalablement posées par Levitt et Lawton (1990) : où suis-je ? où sont les autres lieux par rapport à moi ? comment puis-je faire pour les atteindre depuis l'endroit où je me trouve ? La

réponse à la première question ne nécessite pas forcément de coder la position actuelle en terme de coordonnées dans un cadre de références spatiales dès lors qu'elle est envisagée comme une situation déjà rencontrée par le sujet. Si les caractéristiques particulières du lieu sont reconnues par le sujet, un déplacement approprié vers le but peut être envisagé. La seconde question débouche sur le problème de la quantité d'information traitée pour identifier les relations entre différentes parties de l'espace. En effet, référer la position de tous les autres lieux à sa propre position n'est pas systématiquement nécessaire si l'on connaît la nature des relations spatiales entre différentes sous parties de l'espace. Ainsi la connaissance des réseaux locaux peut diminuer les coûts de traitement et le problème essentiel devient alors de savoir où sont (par rapport à moi) les autres sous parties de l'espace qui sont pertinentes pour le déplacement que j'envisage. Le dernier point fait référence à la notion de planification du déplacement envisagé dans un espace dont le sujet peut appréhender la globalité.

En fait, il semble qu'il faille distinguer la "navigation locale" qui conduit le sujet à utiliser les indices saillants de l'environnement se trouvant dans son espace perceptif et l'habileté à "trouver son chemin" qui, elle, permet d'appréhender des espaces plus vastes pour lesquels les indices saillants se trouvent en dehors du champ perceptif du sujet (Prescott, 1994). La navigation locale serait accomplie grâce à l'utilisation d'informations spatiales provenant de plusieurs modalités sensorielles avec des possibilités de spécificité ou de recouvrement, alors que l'habileté à trouver son chemin relèverait davantage de décisions cognitives prises pour la navigation dans des espaces de plus grandes échelles. Les mécanismes d'extraction d'une connaissance à caractère géographique à partir de la locomotion dans l'espace mettent en jeu des interactions complexes. La conversion d'informations sensorimotrices en connaissances spatiales est un processus indirect dans lequel les traits principaux de l'environnement sont utilisés pour produire des caractéristiques spatiales comme, par exemple, une information de distance. Ces traits principaux incluent aussi bien les aspects physiques tels que les virages, balises et intersections mais aussi les durées de trajets ou l'effort à produire pour réaliser le trajet (Mark et al., 1999).

II -2.3.Les différents types de navigation

II -2.3.1. Quels indices utiliser pour naviguer ?

La définition de Gallistel (1990) insiste sur la nécessité première de déterminer sa propre position afin d'initier une tâche de navigation avec succès. Il existe principalement deux possibilités de prélèvement d'indices utiles pour se positionner. Ces indices peuvent

provenir directement du système qui navigue (animal, humain ou robot) lorsqu'il mesure des variations de son propre état interne et de ses configurations de capteurs sensoriels. On parlera alors de *navigation à l'estime* ("dead-reckoning") par opposition à une *navigation par point de vue* ("piloting") lorsque des points particulièrement signifiants sont identifiés dans l'environnement et sont utilisés comme des balises.

II -2.3.1.1.La navigation par intégration de trajet (path integration)

II -2.3.1.1.1.Un modèle itératif

La navigation par intégration de trajet (au sens mathématique du terme) est un mécanisme qui peut permettre à un sujet de retourner à son point de départ, y compris après un trajet sinueux, sans avoir à puiser d'information dans l'environnement (Figure II-6). Son principe de base est de postuler que la position à l'instant $t + \Delta t$ peut être calculée à partir de l'information de position, de vitesse et d'orientation à l'instant t. Les informations de position peuvent être codées en coordonnées cartésiennes par rapport aux axes d'un repère externe ou en coordonnées polaires par rapport à l'origine du déplacement. La mise à jour de cette représentation s'effectue de façon itérative par addition vectorielle des déplacements effectués pas à pas. Elle fournit une estimation de la position et de l'orientation courantes. Dans ce type de navigation l'information est obtenue en route (Mittelstaedt & Mittelstaedt, 1982) et provient des organes sensoriels tels que le vestibule pour la mesure des accélérations linéaires ou angulaires, les capteurs de la proprioception ou la copie d'efférence de la commande motrice (Von Holst & Mittelstaedt, 1950). Plusieurs types de modèles de "path integration" ont été proposés (Redish, 1997 pour une revue) dont certains sont destinés à rendre compte d'un point de vue comportemental de l'intégration de trajet (Jander, 1957; Mittelstaedt, 1962; Sauvé, 1989).

Mais le principal problème de ces modèles d'intégration de trajet est qu'une erreur de mesure de la vitesse ou de la direction possède des effets cumulatifs qui vont d'autant plus augmenter l'erreur sur les positions à venir que le déplacement sera prolongé. La compensation de ces erreurs est effectuée par une approximation polynomiale (Müller & Wehner, 1988) ou par polygones des fonctions trigonométriques (Hartmann & Wehner, 1995). Cependant Wittmann et Schwegler (1995) ont montré qu'un modèle sans approximation des fonctions trigonométriques est tout à fait réaliste pour la navigation de certains insectes et qu'il est compatible avec des modèles classiques (Mittelstaedt et al., 1982).

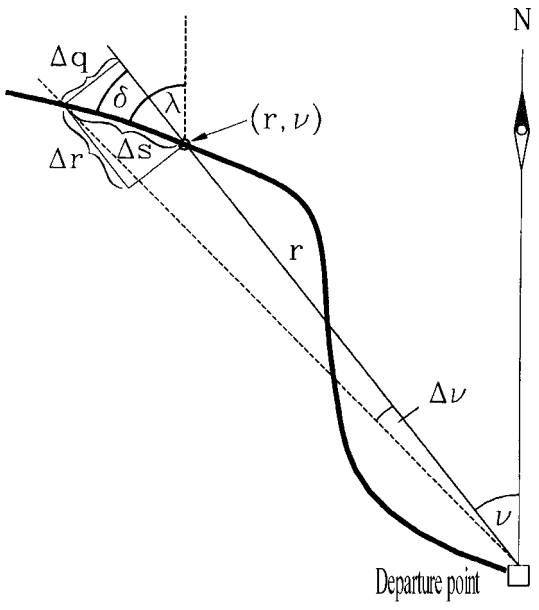


Figure II-6 : Modèle d'intégration de trajet (Hartmann et al., 1995). La distance au point de départ r et l'angle v décrivent la position (r, v) du mobile qui se déplace. La locomotion en direction λ avec un incrément de trajet Δs conduit à la nouvelle position (r + Δr, v + Δv) tant que Δs est fortement inférieur à r.

II -2.3.1.1.2.Mise en oeuvre comportementale

D'un point de vue spatial, certaines situations naturelles (retour au gîte) ou expérimentales ("path completion") font coïncider les points de départ et d'arrivée. Pour réaliser ces tâches, un organisme en déplacement a besoin d'une représentation minimale de sa direction et de sa position actuelles. Dans ce cas la question se pose de connaître les stratégies de retour au point de départ c'est-à-dire les mécanismes de construction (norme et orientation) du vecteur formé par le point où est amorcé le retour et le point d'arrivée. Dans ce type de tâches les sujets sont invités à parcourir les premiers segments d'un trajet en absence de vision et doivent ensuite tenter de retourner directement à l'origine du trajet. Du fait de l'absence de vision, ils ne disposent pas d'information sur leur position par rapport à certains points de repère ni sur les positions relatives de ces points de repère. Les sujets sont contraints d'utiliser d'autres sources informationnelles telles que les entrées proprioceptives, la perception du temps ou de l'effort.

Autrement dit, si l'on se réfère à une classification des méthodes de navigation établie en fonction de l'information de position ("pilotage"), de vitesse ("dead-reckoning ou path integration") ou d'accélération ("navigation inertielle ou path integration") dont dispose le sujet, les tâches de "path completion" ne peuvent pas être accomplies sur la base d'un traitement direct de la position ou de l'orientation du sujet par rapport à des points de repère

externes. L'intégration des trajets ("path integration") s'effectue par le traitement des signaux de vitesse ou d'accélération qui permet de déterminer indirectement les changements de position au cours du temps. Ce traitement se fait par une intégration simple du signal de vitesse ou par une double intégration du signal d'accélération. Il s'agit d'un mécanisme qui permet une navigation autonome puisqu'il utilise exclusivement des informations acquises en cours de route pour établir la relation spatiale entre le système qui navigue et le point de départ (Mittelstaedt et al., 1982). Cette habileté se retrouve chez de nombreuses espèces animales telles que des insectes (Hartmann et al., 1995; Durier & Rivault, 1999; Schatz, Chameron, Beugnon, & Collett, 1999) des crustacés (Zeil, 1998), des mammifères (Benhamou, 1997b; Whishaw, McKenna, & Maaswinkel, 1997; Dassonville, Schlag, & Schlag-Rey, 1995). L'homme semble également capable d'utiliser des signaux de vitesse et d'accélération générés en route pour naviguer (Mittelstaedt & Glasauer, 1991; Glasauer, Amorim, Vitte, & Berthoz, 1994; Glasauer, Viaud-Delmon, Amorim, & Berthoz, 2000; Klatzky, Loomis, & Golledge, 1997; Loomis et al., 1993; Loomis, Klatzky, Golledge, & Philbeck, 1999; Takei, Grasso, Amorim, & Berthoz, 1997).

II -2.3.1.2.La navigation par points de vue

Lorsque le but final est masqué, le sujet peut être contraint de se repérer de façon égocentrique par rapport à une série de balises perçues[1] simultanément. Chaque balise, fournit une indication de position (proche ou lointaine) et d'orientation au sujet. Ainsi, la configuration de balises est spécifique de la position depuis laquelle elle est perçue. Par conséquent la tâche d'un sujet qui navigue consiste à rapprocher par son déplacement sa perception courante de la configuration de balises de la perception mémorisée de cette même configuration. Ceci peut être réalisé par les insectes (Judd et al., 1998; Cheng, 1999b; Cheng, 1999a; Giurfa & Capaldi, 1999 pour une revue; Collett & Rees, 1997). La réduction des écarts perceptifs est à l'origine de cette stratégie de navigation par points de vue qui se décompose chez les insectes en i) une reconnaissance des scènes de l'environnement, ii) des déviations partielles, iii) un déplacement vers des balises familières et iv) la mise en correspondance d'images de l'environnement (Collett, 1996). A cet égard, la stabilité spatiale des balises qui composent le paysage perçu semble contribuer à l'apprentissage spatial chez l'animal (Biegler

[1] Bien qu'elle soit très souvent évoquée lorsqu'il s'agit de navigation, la perception visuelle n'est pas seule à intervenir et les points saillants de l'environnement peuvent, par exemple, être entendus ou sentis de façon tactile lorsqu'il s'agit de se situer par rapport des partenaires sur un terrain de sport ou à la direction du vent lors d'une promenade en mer.

& Morris, 1996). Chez les mammifères et chez l'homme, ces stratégies de navigation par point de vue sont probablement en interaction avec celles de "path integration" précédemment évoquées (Etienne, Maurer, & Seguinot, 1996 pour une revue).

II -2.3.2.Quelles stratégies pour naviguer ?

Si la réalisation d'un trajet fait référence à la nécessité de se rendre d'un lieu à un autre en étant éventuellement passé par une série de balises intermédiaires atteintes selon un ordre précis, la question de la stratégie mise en oeuvre pour acquérir une connaissance fiable d'un espace plus vaste que celui déjà expérimenté par le sujet se pose. Il s'agit de déterminer les stratégies qui permettent de produire des trajectoires inédites. Deux types de stratégies , non exclusives l'une de l'autre, sont principalement identifiées pour expliquer l'acquisition et le stockage des connaissances spatiales nouvelles. Premièrement, dans un espace *topologique*, le sujet peut stocker une suite de déplacements ou de vues locales, puis les agencer mutuellement par concaténation pour produire un nouveau trajet. Il utilise alors une représentation de l'espace de type *route*. Dans ce cas les nouveaux trajets sont exclusivement constitués de points déjà visités. Deuxièmement, pour pouvoir rallier des points déjà visités en empruntant des chemins comportant des points nouveaux, le sujet doit compléter son information en adoptant un point de vue plus global, une sorte de vue plongeante sur les lieux déjà visités. Dans ce cas, il utilise une représentation *métrique* de l'espace de type *survol* pour déduire la position des nouveaux points à partir de celle des points déjà connus. Ce type de stratégie donne la possibilité de prendre des raccourcis, d'effectuer des détours.

Les modèles pas-à-pas sont opposés, chez l'homme, à un modèle "configural" qui postule le stockage de la totalité de la trajectoire en mémoire (Klatzky, Beall, Loomis, Golledge, & Philbeck, 1999). Lorsque le sujet souhaite retourner à son point de départ, il utilise la configuration stockée pour calculer la direction de ce point. Loomis et al. (1993) et Fujita et al. (1993) considèrent qu'un processus général basé sur cinq mécanismes complémentaires permet de répondre à la variété des tâches de navigation en absence de vision. Ces mécanismes ne sont pas nécessairement mis en oeuvre simultanément à chaque instant lors de la navigation. Cependant naviguer sans vision impliquerait i) de capter l'information, ii) de créer une trace de la route, iii) de former une représentation d'ensemble de la nature et de l'agencement des éléments de l'espace, iv) de calculer les trajectoires souhaitées et v) de les réaliser. Selon les auteurs, la capture de l'information sur le déplacement propre et / ou sur les repères saillants de l'espace (balises) peut être réalisée par différentes modalités sensorielles. La notion de trace de la route fait référence à une mémoire sensorielle ou même à

une représentation plus abstraite de segments et de changements directionnels. Dans les deux cas cette trace peut subir des distorsions perceptives et mnémoniques. Le calcul des trajectoires souhaitées s'effectue par intégration de l'information issue du parcours d'un trajet singulier à un dispositif représenté, plus vaste et destiné à coder les distances et les directions de l'ensemble des trajets. A ce stade les auteurs ne certifient pas la continuité et l'homogénéité de l'espace représenté. Enfin, le dernier processus prend en charge la sortie motrice qui permet la réalisation du trajet envisagé.

II -2.4.Vers une nouvelle classification

Un détour vers des modèles de robots navigateurs dont le mode de fonctionnement est inspiré de systèmes biologiques réels permet de clarifier les caractéristiques des stratégies de navigation. Dans le cas d'agents artificiels biomimétiques ("animats") plusieurs stratégies de navigation peuvent être envisagées selon des critères a) de choix des informations spatiales utilisées, b) de mode d'utilisation de ces informations et c) de type de problèmes de navigation qui peuvent être résolus. Un premier niveau de contrôle d'un agent ayant pour fonction de rejoindre un but spatial donné consiste à utiliser ses capteurs sensoriels (visuels, auditifs, olfactifs...). Il peut ainsi évaluer et réguler (réduire pour s'approcher ou augmenter pour s'éloigner) la distance et / l'orientation par rapport à ce but. Sur la base d'un gradient de perception directe et de boucles sensori-motrices simples le système peut s'orienter et s'approcher de sa cible. Ce type de système peut réussir la tâche dans le cas où la cible finale n'est pas directement perçue à condition qu'il ait pu identifier et atteindre des "points de repère" ou "balises" d'où il pourra ensuite percevoir la cible finale. Un second niveau de contrôle est identifié par exemple par O'Keefe et al. (1978), qui consiste à "maintenir certaines relations égocentriques" par rapport à "un point de repère ou une balise particulière". Cependant, la mémorisation de cet ensemble de relations à des objets ne repose pas forcément sur une information représentée, mais plus simplement sur l'état des configurations de capteurs sensoriels qui contribuent à la perception des points de repère. Ce mode de contrôle pourrait être mis en jeu en navigation pour longer la bordure d'un parcours (conservation de la distance à l'objet) ou pour aller rencontrer un autre objet en mouvement sur une trajectoire rectiligne (conservation de l'azimut). Pour Trullier et al. (1997), ce niveau de contrôle sous forme de "guidage" (ou conduite) consiste essentiellement à optimiser le rapport entre l'état des capteurs sensoriels et l'information sensorielle mémorisée sans recourir à des stratégies de plus haut niveau pour lesquelles une "représentation spatiale" serait élaborée. Si la complexité de la tâche l'exige, un "animat" plus perfectionné commence à recourir à des systèmes de

représentation spatiale pour passer de déplacements locaux déclenchés par la perception de la cible finale, à des déplacements à grande échelle dans lesquels la cible n'est pas directement perçue. Il s'agit d'une "réponse déclenchée par la reconnaissance d'un lieu". Pour cela, il faut identifier le lieu dans lequel on se trouve, s'orienter dans ce lieu puis sélectionner la direction à prendre pour atteindre le prochain sous but. A ce niveau, le système ne possède pas encore la connaissance de la totalité du trajet mais agit pour atteindre de proche en proche une série de buts locaux. Un système de représentation qui permet d'anticiper la position future à partir de la position actuelle par une association "lieu-but-action-lieu", permet aussi de créer un ensemble de "routes" par lesquelles un but donné est atteint depuis un point de départ donné. Il s'agit alors essentiellement de trouver la séquence de lieux déjà connus à rejoindre successivement pour atteindre le but final. Il en résulte, par concaténation des différents segments parcourus, une "route" nouvelle si les segments ont été parcourus dans un ordre nouveau. Cependant, cette "navigation topologique" ne fournit pas *a priori* de représentation exhaustive des propriétés de l'espace puisqu'aucune indication ne permet de savoir qu'un même lieu peut appartenir simultanément à plusieurs routes. Un réseau de liens cohérents entre les routes et les lieux de l'espace est mis en place au stade de la "navigation métrique", lorsque l'atteinte de nouveaux lieux ne dépend pas systématiquement des trajets précédemment empruntés ou des lieux déjà visités. Il permet au mobile en déplacement d'emprunter de nouvelles routes et d'adopter des stratégies de "détours" et de "raccourcis métriques" (Figure II-7).

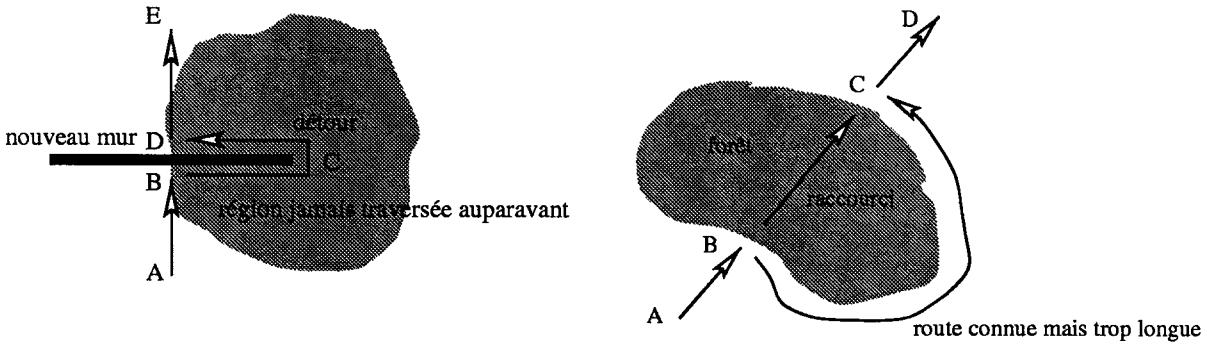


Figure II-7 : La présence de contraintes sur le parcours entraîne des stratégies de contournement ou de raccourci métriques (Trullier et al., 1997).

L'examen des différentes stratégies montre une certaine hiérarchie qui se traduit par la possibilité pour un système de réguler sa progression par asservissement simple à la valeur d'une variable d'éloignement ou d'orientation, mais aussi par le recours à des formes plus élaborées de "représentation spatiale". Malgré cette hiérarchie, il reste possible que des stratégies de bas niveau viennent prendre le pas sur des stratégies de plus haut niveau si elles permettent d'obtenir une efficience égale ou supérieure. De plus, les résultats obtenus au moyen des stratégies de bas niveau ("guidage" et "orientation du corps et approche de la cible" en particulier) montrent qu'il n'est pas toujours indispensable de recourir "à l'extraction, au traitement et au stockage de toute l'information spatiale contenue dans l'environnement" (Trullier et al., 1997).

II -3. Les déplacements du corps entier chez l'homme

II -3.1.Déplacements linéaires

Dans le cadre d'études portant sur l'utilisation des informations sensorielles dans la perception de l'espace, des paradigmes de pointage locomoteur vers une cible sont utilisés. Il s'agit d'atteindre un point de l'espace par un déplacement du corps entier en percevant la cible ou bien en absence de perception directe de la cible dès le début du déplacement. Dans ce cas le déplacement est réalisé vers une cible mémorisée (Figure II-8).



Figure II-8 : Paradigme de pointage locomoteur. Il s'agit de déplacer le corps entier vers une cible dont on perçoit ou mémorise la position (d'après Loomis et al. (1996)). Le cercle plein représente la position physique réelle de la cible alors que le cercle vide représente sa position imaginée.

Parmi les tâches de pointage locomoteur complexe, la course d'élan du sauteur en longueur a fait l'objet d'une attention particulière (Lee, Lishman, & Thomson, 1982; Laurent & Thomson, 1988; Berg, Wade, & Greer, 1994). Ce modèle de mouvement a permis d'étudier la régulation visuelle de la locomotion bipédique à grande vitesse et les résultats sont interprétés à la lumière des propositions théoriques de Lee (1976; 1998) et Lee et al. (1982) qui insistent sur le rôle du "time to contact". Cependant, Berg et al. (1994) et Farrell et al. (1999; 1998) expriment des réserves quant à la primauté de cette hypothèse. Ils suggèrent une participation coopérative plutôt que concurrentielle des différentes sources d'information dans la régulation visuelle de la locomotion bipédique.

En situation naturelle, il est possible de regarder une cible puis de fermer les yeux et de marcher pour s'en approcher au plus près. Cette habileté a été analysée expérimentalement (Elliott, 1987; Loomis, Da Silva, Fujita, & Fukusima, 1992). Par exemple, Rieser et al. (1990) rapportent que des adultes devant marcher en ligne droite vers des cibles préalablement mémorisées sur une distance variant de 2 à 22 mètres produisent peu d'erreur. Leur erreur variable moyenne est de l'ordre de 8% de l'éloignement initial de la cible alors que l'erreur constante moyenne n'est que de 2%. La question se pose de savoir comment les sujets peuvent produire une performance aussi proche des valeurs requises. Il s'agit en fait d'élucider certains mécanismes mis en jeu lors de la calibration de la locomotion humaine. Pour Rieser et al. (1995) la marche en condition de vision normale fournit des informations sous formes de flux

(visuels, sonores, ...) qui permettent de spécifier des orientations et des distances par rapport à l'environnement perçu. L'analyse des covariations de ces flux résultant des variations de leur activité biomécanique permet au sujet "d'apprendre à partir des conséquences visibles (et autres) de leur activité biomécanique". Cette hypothèse suppose l'existence d'une certaine flexibilité du système perceptivo-moteur qui peut être mise en évidence au moyen de paradigmes expérimentaux où les entrées sensorielles sont artificiellement décorellées. Dans une série d'expériences, des changements dans la calibration de la marche ont été provoqués en habituant des sujets à marcher sur un tapis roulant lui-même tiré par un tracteur (Rieser, Pick, Ashmead, & Garing, 1995). Les vitesses du véhicule et du tapis n'étant pas toujours couplées, les sujets sont confrontés à une condition "biomécaniquement plus rapide" pour laquelle le tapis se déplace plus vite que le tracteur (respectivement 8 et 5 km/h) et à une condition "biomécaniquement moins rapide" pour laquelle le tapis se déplace à 7 km/h et le tracteur à 17 km/h. Après cette phase d'habituation, les auteurs enregistrent des erreurs de pointage locomoteur vers une cible placée à 8 m qui vont dans le sens d'une surestimation de la distance dans la condition "biomécaniquement plus rapide" et d'une sous-estimation dans la condition inverse. Le modèle "d'apprentissage perceptif" élaboré par Rieser et al. (1990) ne nécessite pas forcément un traitement calculatoire pour obtenir l'information de position. Cette information est déduite de la comparaison des flux sensoriels fournis par les réafférences d'actions ayant un rapport fonctionnel. Sinai et al. (1998) ont confirmé l'importance du rôle joué par les informations visuelles lors de la perception de la cible. En modifiant la nature du sol entre le sujet et la cible (continuité, homogénéité, couleur), ces auteurs ont montré une dégradation de la performance lors du pointage locomoteur en absence de vision et suggèrent que la texture du sol constitue un cadre de référence potentiel pour le codage des informations spatiales.

La mémoire du mouvement propre sans repère externe a été étudiée (Berthoz, Israël, Georges-François, Grasso, & Tsuzuku, 1995; Israël, Grasso, Georges-François, Tsuzuku, & Berthoz, 1997; Georges-François, Grasso, Berthoz, & Israël, 1995) avec une méthode de reproduction constituée de deux phases : une phase de transport passif (stimulus) suivie d'une phase de transport actif (réponse). Il s'agit pour le sujet assis sur le siège d'un robot mobile télécommandé par l'expérimentateur de reproduire le mouvement imposé dans la même direction au moyen d'un joystick (Figure II-9 A et B). Par conséquent le sujet s'éloigne de plus en plus de son point de départ pour effectuer un "pointage du corps entier" (Israël, 1998). Les principaux résultats de ces expériences montrent que la distance d'un trajet passif est

reproduite de façon satisfaisante. De plus, cette reproduction est accompagnée de la reproduction de la durée, du pic et du profil de vitesse (Figure II-9 C).

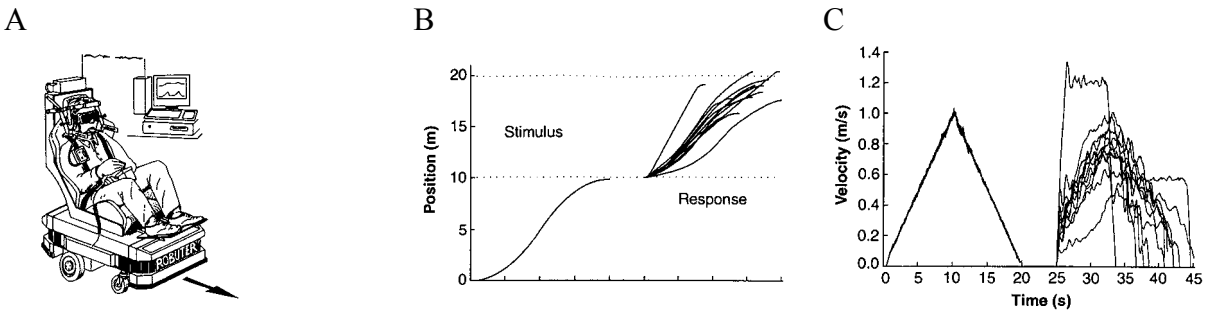


Figure II-9 : Paradigme utilisé par Berthoz et al. (1995). La méthode de reproduction constituée de deux phases : une phase de transport passif suivie d'une phase de transport actif. Il s'agit pour le sujet assis sur le siège d'un robot mobile télécommandé par l'expérimentateur (A) de reproduire le mouvement imposé dans la même direction au moyen d'un joystick (B). Cette reproduction est accompagnée de la reproduction de la durée, du pic et du profil de vitesse (C).

Enfin, il a été montré que la reproduction de la distance est réalisée pour elle-même et non comme une conséquence de la reproduction de durée du transport passif initial puisque les sujets étaient capables de reproduire différentes distances alors que la durée restait constante. Le fait de très bien reproduire les distances imposées sans point de repère ou d'ancrage initial avec une reproduction concomitante du profil de vitesse conduit les auteurs suggérer l'utilisation par le système nerveux central des paramètres dynamiques du mouvement pour l'estimation et la mémorisation de son amplitude. Ces résultats doivent cependant être nuancés pour la condition à durée non constante en fonction de l'ordre de grandeur de la distance à reproduire. Les distances courtes (2 m) sont surestimées (+ 0.31 m) alors que le phénomène inverse est enregistré (- 0.8 m) pour les distances plus longues (10m). Mais, ils sont tout à fait comparables à ceux que rapportent Loomis et al. (1993) pour la reproduction marchée et en absence de vision d'un déplacement préalablement effectué avec le guidage de l'expérimentateur (+ 0.26 m à 2 m et -1 m à 10 m). Par contre, cet "effet de gamme" disparaît pour la condition à durée constante et la performance des sujets dépend alors principalement du profil de vitesse du déplacement passif. Pour cette condition, un profil de vitesse triangulaire qui sollicite les otolithes de façon continue conduit à de fortes différences entre les profils de vitesse du stimulus et de la réponse. Les profils rectangulaires et trapézoïdaux, composés d'un segment à vitesse constante, conduisent à une forte variabilité de la distance reproduite. Cependant, les résultats des études utilisant le transport passif montrent que les signaux vestibulaires et somato-sensoriels générés lors de cette phase du déplacement linéaire peuvent être utilisés pour élaborer une représentation statique mais

également dynamique du chemin parcouru. Une étude récente (Harris, Jenkin, & Zikovitz, 2000) a confirmé le caractère complexe des interactions visuo vestibulaires dans l'évaluation de la distance de transport linéaire passif. Les auteurs évoquent l'hypothèse de calibrations différentes entre le système visuel et les autres systèmes sensoriels dédiés à la mesure du mouvement propre. Ces écarts auraient pour conséquence une *capture vestibulaire* du fait de la domination de la modalité visuelle par la modalité vestibulaire.

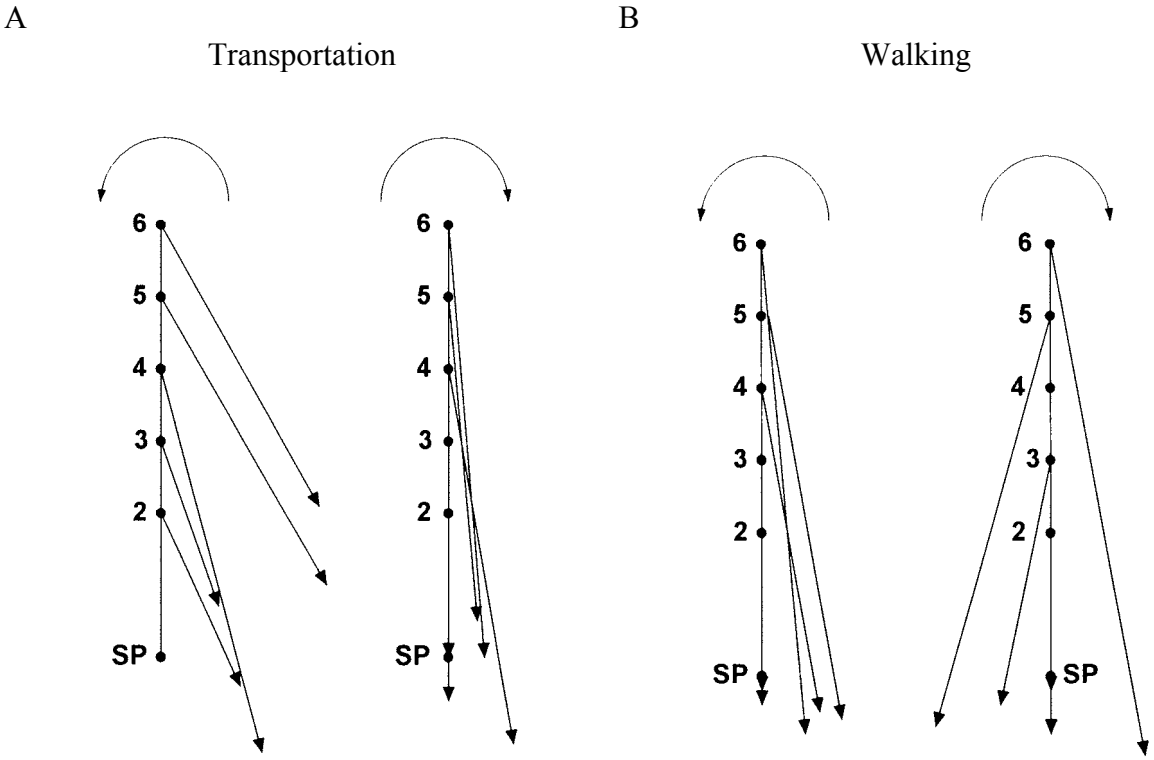


Figure II-10 : Trajets retour effectués par un sujet typique s'étant déplacé passivement (A) ou activement (B) jusqu'à un point de changement de direction distant de 2 à 6 mètres de sont point de départ (Marlinsky, 1999a).

Une tâche différente a été mise au point par Marlinsky (1999a) pour étudier la perception vestibulaire et vestibulo-proprioceptive du déplacement linéaire (Figure II-10). Elle consiste en un déplacement aller de 2 à 6 mètres (marché *vs* passivement transporté) et retour direct en marchant vers le point de départ après un demi tour vers la droite ou vers la gauche. Les sujets sont alors confrontés à la nécessité de définir la direction et la longueur du trajet retour. La position et l'orientation initiale du sujet lui-même suggèrent toujours un point de départ dans ce type de tâches. Si la connaissance de sa propre position est donnée au sujet par l'intégration des signaux générés par son propre mouvement c'est-à-dire les flux visuel, vestibulaire et somato-sensoriel, il est clair que le point de départ joue un rôle fondamental. Il pourrait permettre la remise à zéro de l'intégrateur et l'initialisation du processus d'intégration.

Cependant les résultats sont compatibles avec ceux de Berthoz et al. (1995). Dans la condition "déplacement passif" les sujets ont tendance à surestimer les courtes distances alors qu'ils ont tendance à sous-estimer les distances les plus longues. Par contre, toutes les distances sont surestimées de façon systématique en condition "déplacement actif", sans que cette surestimation ne dépende de la longueur du trajet aller. Là aussi, les résultats sont en accord avec ceux de travaux précédents.

La relation entre l'erreur de translation et la distance du trajet à parcourir a été observée sur des trajets aller retour réalisés en parcourant des distances de 6 à 11 mètres (Sauvé, 1989) et à des vitesses sensiblement différentes à l'aller et au retour. Elle a été modélisée sous la forme $Etr^2 = (0.25)^2 * l$ où *Etr* est l'erreur de translation et *l* la longueur du trajet.

L'utilisation des signaux d'accélération fournis par le système vestibulaire pour calculer la position du sujet par rapport à l'environnement lors d'un déplacement linéaire marché a été évaluée (Glasauer et al., 1994). Les auteurs ont quantifié les comportements locomoteurs de sujets sains et de sujets labyrinthiques bilatéraux marchant à différentes vitesses en vision normale ou en absence de vision vers une cible matérialisée au sol et distante de 4 m de leur point de départ. Ils ont ensuite comparé les performances des deux groupes. Leurs principaux résultats indiquent que les sujets sains et labyrinthiques ont tendance à légèrement surestimer la distance à laquelle se trouve la cible. Bien que la distribution des mesures soit plus large pour les sujets labyrinthiques, ils se distinguent surtout des sujets sains par une tendance marquée à dévier vers la droite ou la gauche par rapport à un trajet direct. Selon les auteurs, cette tendance à la déviation pourrait provenir de certains problèmes de déséquilibre rencontrés par les sujets labyrinthiques lors de leur progression vers la cible, ou de leur incapacité à maintenir une trajectoire rectiligne en direction de la cible du fait d'une absence d'information issue des canaux semi-circulaires. Des indices complémentaires (écart type de la direction de chaque pas par rapport à la direction point de départ / cible, vitesse moyenne, longueur et fréquence du pas) sont interprétés comme la mise en œuvre par les sujets labyrinthiques de stratégies de compensation des problèmes d'équilibre. L'ensemble de ces résultats (Glasauer et al., 1994) montre que l'information idiothétique utilisée par les sujets labyrinthiques est suffisante pour estimer la distance dans une tâche de pointage linéaire simple. Cette estimation serait réalisée par une mise à jour continue de l'estimation de la position du sujet par rapport au trajet ou à la cible suivie de corrections des déviations latérales.

Ces déviations latérales ne sont pas spécifiques des sujets labyrinthiques. Elles peuvent se produire également pour des sujets sains. Ils sont dits "homotropiques" lorsque leurs essais sont déviés beaucoup plus souvent d'un côté que de l'autre par opposition aux sujets "hétérotropiques" qui dévient aléatoirement vers la droite ou la gauche. Les résultats de Glasauer et al. (1994) ne font pas état de déviations unilatérales marquées pour les sujets de leur expérience mais l'origine plutôt centrale ou plutôt périphérique de ces déviations "homotropiques" reste à établir. D'une part, les déviations peuvent être envisagées comme le résultat d'une mauvaise perception de la trajectoire du corps. Dans ce cas la tendance à dévier devrait se retrouver pour tous les modes de déplacement utilisés par le sujet et serait probablement d'origine centrale ou vestibulaire. D'autre part, quand le déplacement est réalisé par l'action combinée de deux effecteurs (deux jambes dans le cas de la marche par exemple) les déviations peuvent être envisagées comme le résultat d'un manque de compensation d'une éventuelle différence, fut-elle très légère, entre les propriétés des deux effecteurs. Boyadjan et al. (1999) postulent que l'existence d'un mécanisme central devrait conduire à des déviations identiques pour un même sujet malgré la modification du mode de déplacement. Inversement, si l'origine des déviations est périphérique, les sujets "homotropiques" devraient devenir "hétérotropiques" dès que les jambes ne sont pas utilisées pour le déplacement. Pour tester leur hypothèse, ils ont demandé à des sujets sains "homotropiques" de se déplacer le plus droit possible sur 15 mètres en absence de vision. Ce déplacement était effectué en marchant, en actionnant une chaise roulante avec les bras ou en étant poussé dans la chaise roulante par un expérimentateur à qui le sujet donnait ses instructions sur la rectitude du déplacement. Les résultats montrent que la perception de la trajactoire n'est pas précise mais également que l'origine des déviations "homotropiques" est plutôt périphérique. En effet, tous les sujets "homotropiques" deviennent "hétérotropiques" dans la condition de conduite verbale. Même lorsqu'ils se déplacent avec leurs membres la moitié des sujets dévient vers des côtés opposés selon qu'ils marchent ou qu'il propulsent la chaise roulante. Ces modifications de comportement, essentiellement liées à la nature des effecteurs, conduisent les auteurs à confirmer le rôle de la vision dans la correction des petites déviations engendrées par l'action dissymétrique des effecteurs. Ces conclusions ne sont pas opposées à celles de Gordon et al. (1995) qui ont également constaté des déviations de trajectoires lors de la marche alors qu'elles ne se reproduisaient pas lors de déplacements en chaise roulante. Ils interprètent leurs résultats en considérant que les sujets, longuement habitués à subir une situation de conflit entre les entrées somato-sensorielles et motrices d'une situation de marche sur tapis roulant circulaire et les entrées vestibulaires classiques de la marche en ligne droite, s'adaptent à un

problème qui n'est pas d'origine vestibulaire. D'ailleurs les résultats de Millar (1999), obtenus par manipulation d'entrées sonores et de contraintes posturales, montrent également une origine mixte (externe ou centrée sur le sujet) des sources d'information utilisées pour s'orienter dans l'espace. En effet, des sujets privés de vision ont tendance à dévier vers un bruit très faible qui leur est délivré depuis une source latérale alors qu'ils dévient du côté opposé à celui de l'épaule sur laquelle ils portent une charge.

II -3.2.Rotation du corps

Les questions soulevées par la perception des déplacements rectilignes et la calibration de la locomotion en ligne droite se posent également pour les déplacements en rotation. En reprenant les paradigmes déjà développés par Rieser et al. (1995), Pick et al. (1999) ont demandé à des sujets de pointer vers des cibles visuelles après des sessions de marche sur plateau tournant avec une vitesse de rotation apparente corrélée ou décorélée à la vitesse du pas. La calibration de l'espace nécessaire à la réussite des tâches de pointage demandées après la session de marche a été attribuée par les auteurs à deux mécanismes différents. Le premier serait une simple adaptation sensorielle à la situation de marche sur place vécue pendant plusieurs minutes par les sujets. Le second relèverait d'un sorte d'apprentissage perceptif de l'absence de corrélation entre le flux optique et les entrées sensorielles générées par l'action des membres inférieurs lors de la locomotion circulaire.

La contribution des différentes modalités sensorielles et en particulier des signaux vestibulaires d'origine otholitique et canalaire a été envisagée lors de rotations passives du corps par rapport à l'axe de la verticale gravitaire ou de l'horizontale terrestre (Israël, Koenig, & Fetter, 1993). Israël et al. (1995) ont montré, en stimulant uniquement les canaux semi-circulaires des sujets lors d'un aller retour en rotation autour de l'axe vertical dans le noir, que les sujets traitent différemment les deux parties du trajet. A l'aller, les sujets doivent construire la position angulaire requise sans aucune référence externe et, ce faisant, sous-estiment l'angle à couvrir proportionnellement à sa valeur réelle, c'est-à-dire qu'ils surestiment leur propre rotation. Au retour, les sujets retournaient à l'orientation de départ en intégrant les informations de vitesse et d'accélération angulaires générées lors du trajet aller. Pour cette partie du trajet, les résultats n'indiquent pas d'effet de l'amplitude de la rotation demandée qui s'accompagne d'une diminution de la variabilité. L'interprétation de ces données favorise l'hypothèse de la construction d'une représentation interne d'un point de départ virtuel (la position initiale du corps) qui deviendrait alors un but plus clairement défini que l'angle de rotation. Le rôle du point de départ a été élucidé (Israël, Bronstein, Kanayama, Faldon, &

Gresty, 1996) dans une étude similaire où les sujets assis sur une chaise tournante étaient déplacés passivement à l'aller et contrôlaient eux-mêmes leur retour au moyen d'un joystick. Les auteurs ont comparé les réponses ("trajets retour") dans des conditions expérimentales pour lesquelles une cible fixe dans un référentiel fixe par rapport au laboratoire i) était ou ii) n'était pas présentée aux sujets avant le début du trajet aller. Les résultats montrent que les sujets qui ont bénéficié de la présentation de la cible sont plus précis sans qu'il y ait de relation entre l'amplitude et la vitesse de la réponse alors que la précision est dégradée chez les autres sujets qui fournissent une réponse proportionnelle au pic de vitesse du trajet retour. Dans un processus d'intégration des signaux de vitesse angulaire de la tête, le rôle du point de départ serait de permettre la mise en place d'une intégration en temps réel en remettant à zéro le module d'intégration et, par conséquent, d'améliorer la précision.

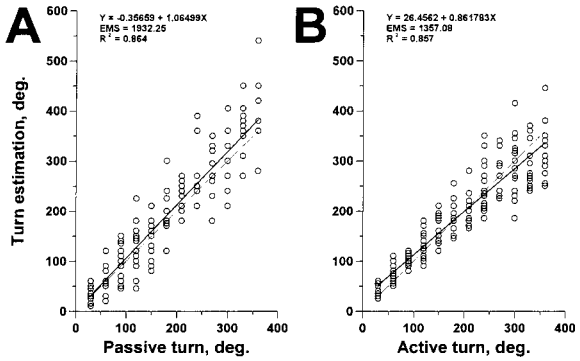


Figure II-11 : Résultats obtenus par Marlinsky (1999b) pour l'estimation des rotations d'axe vertical pour un déplacement initial passif (A) et actif (B).

Des études récentes ont cherché à comparer l'estimation des rotations dans le cas de déplacements passifs et actifs. Marlinsky (1999b) a montré que l'amplitude de la rotation est un facteur qui affecte différemment les rotations passives et actives (Figure II-11). La surestimation des rotations passives comprises entre 30° et 360° est une fonction linéaire de l'amplitude subie (Y = -0.357 + 1.065 X ; R^2 = 0.864). Par contre, l'auteur observe une tendance à la surestimation des rotations actives d'amplitude faible et à une sous-estimation des amplitudes plus importantes (Y = 26.456 + 0.862 X ; R^2 = 0.857). Il définit l'estimation de la rotation comme une tâche de nature géométrique qui associe les composantes angulaires et linéaires du déplacement des capteurs sensoriels qui ne sont jamais situés sur l'axe de rotation. Il en découle une perception d'une métrique hétérogène du plan horizontal dont l'étendue serait relative à la rotation estimée. La différence de perception des rotations actives et passives est confirmée par Jürgens et al. (1999) même si leurs résultats restent différents de

ceux de Marlinsky (1999b). Ils mettent en évidence une utilisation spécifique des signaux d'origine proprioceptive et de ceux issus de la commande motrice en comparant les résultats de 12 sujets soumis à deux tâches (active en marchant sur place en tournant ou rotation passive sur plate-forme mobile) et deux modes d'estimation des rotations (verbal ou en arrêtant leur rotation s'ils estimaient avoir atteint l'amplitude attendue par l'expérimentateur). Après une brève accélération des angles de 30° à 810° ont été parcourus à une vitesse angulaire constante de 18.5, 37 ou 55 °/sec. Les résultats ne font pas apparaître d'effet de la condition de vitesse. Par contre, des différences existent entre les rotations actives et passives. Les premières conduisent les sujets à des estimations proportionnelles aux amplitudes réelles avec un gain proche de 1 pour les deux modes d'estimation. Les rotations passives, elles, ne sont pas estimées avec la même précision. En effet, on retrouve des phénomènes déjà observés de surestimation des faibles amplitudes et de sous estimation des fortes amplitudes pour le mode verbal. Les réponses fournies avec le second mode d'estimation restent moins complexes (linéaires) mais conduisent à de fortes surestimations des rotations de grande amplitude. L'amélioration des performances perceptives obtenue en condition active renforce l'idée d'une participation importante des signaux proprioceptifs et efférents qui viendraient soit fusionner avec les signaux vestibulaires, soit les remplacer. Il est possible que la mobilisation de ressources attentionnelles supplémentaires soit également à l'origine des baisses de performances en condition passive (Yardley, Gardner, Lavie, & Gresty, 1999). Dans le modèle de Sauvé (1989) l'erreur aléatoire de rotation *Erot* s'exprime sous la forme $Erot^2 = (1.47)^2 * \alpha$ où α est l'angle à parcourir. Ce résultat est obtenu lors d'un protocole classique de rotation active aller retour d'amplitude comprise entre 45 et 315°. Comme dans l'expérience de déplacement linéaire, l'auteur a imposé aux sujets d'effectuer le trajet retour à une vitesse différente de celle du trajet aller.

II -3.3.Déplacement dans un espace bidimensionnel

Il est rare que les trajectoires d'un sujet qui navigue dans le plan horizontal soient exclusivement une droite ou un point. Cela signifierait qu'il produit une seule translation ou une seule rotation "pures" et aurait pour conséquence une impossibilité d'atteindre tous les points du plan. Des trajectoires beaucoup plus complexes, composées de combinaisons de translations et de rotations, sont nécessaires à l'exploration de toutes les parcelles de l'espace bidimensionnel de navigation. Les trajectoires résultantes sont alors des polygones ou des arcs de cercles.

II -3.3.1.Déplacements par enchaînements de translations et de rotations

II -3.3.1.1.Les méthodes de triangulation

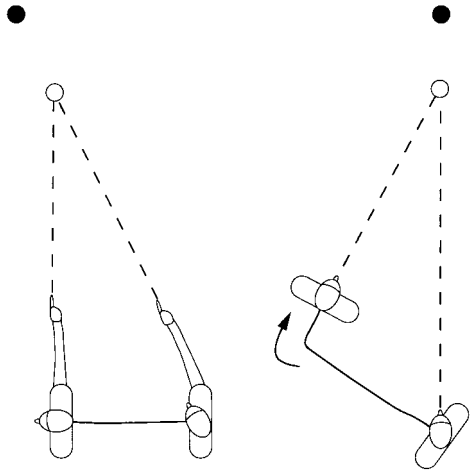


Figure II-12 : Paradigme de triangulation d'après Loomis et al. (1996). Le cercle plein représente la position physique réelle de la cible alors que le cercle vide représente sa position imaginée. Cette position est obtenue par triangulation en pointant (à gauche) et en marchant (à droite).

Il est possible de tester la précision de la représentation de l'espace au cours ou à l'issue de déplacements locomoteurs par des techniques de triangulation (Loomis et al., 1992; Fukusima, Loomis, & Dasilva, 1997). Elles consistent à reconstruire la position d'un point de l'espace à partir de sa direction perçue ou estimée par le sujet lui-même situé en deux lieux distincts de l'espace à deux instants différents. En pratique, le sujet indique la direction de la cible puis se déplace en absence de vision avant d'indiquer à nouveau, depuis sa nouvelle position, la direction de cette même cible. Il peut donner les directions de la cible en tendant son bras vers elle ou en marchant vers elle après un changement de direction demandé par l'expérimentateur. L'intersection de ses deux droites de visée fournit, par un calcul de triangulation, la position estimée par le sujet de la cible dans l'espace (Figure II-12).

Bien qu'ils portent essentiellement sur l'estimation de la distance égocentrique (c'est-à-dire de la distance entre le sujet et une cible située dans l'espace de navigation), les résultats montrent que les distances inférieures à 15 m sont estimées précisément alors qu'entre 15 et 25 m une légère tendance à la sous estimation apparaît (Fukusima et al., 1997).

II -3.3.1.2.La méthode de complétion de trajet (path completion)

Comme nous l'avons dit, la méthode d'aller retour est souvent utilisée pour rendre compte de la perception de l'espace dans des cas de déplacements simples. L'étude de la marche réelle a mis en évidence plusieurs types de coordinations permettant de changer de direction sur des trajets possédant deux côtés (Patla, Adkin, & Ballard, 1999). La complétion de trajet (*path completion*) est une méthode de choix pour analyser la représentation de l'espace lors de trajets composites dans l'espace réel (Klatzky et al., 1990; Klatzky, 1999; Loomis et al., 1993; Glasauer et al., 1995) ou virtuel (Peruch, Vercher, & Gauthier, 1995; Peruch, May, & Wartenberg, 1997; Peruch & Gaunet, 1998). Dans un premier temps il s'agit pour l'expérimentateur de guider le sujet sur la partie initiale du trajet avant de lui demander dans un deuxième temps de rallier son point de départ ou d'indiquer la position ou l'orientation d'un point particulier de l'espace (Figure II-13).

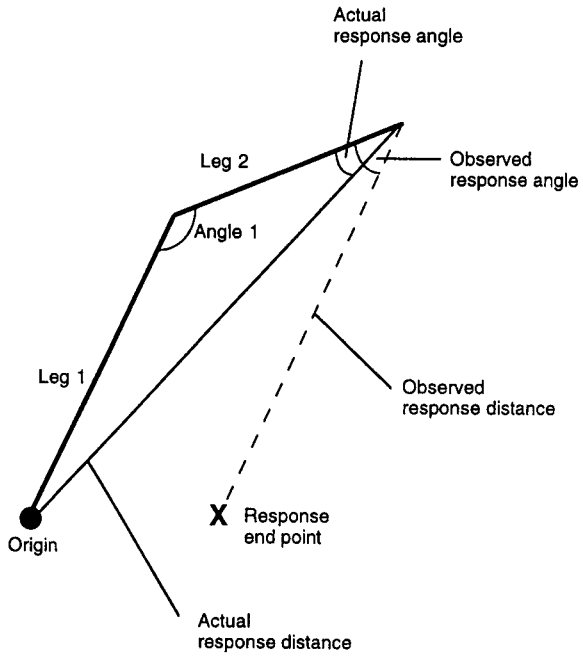


Figure II-13 : Prototype de tâche de complétion de polygone (Klatzky, 1999).

Ces déplacements sont réalisés en absence de vision de telle sorte qu'aucune source d'information sur des cibles proches ou sur le mouvement lui-même n'est disponible. Là aussi les sujets sont contraints de construire leur représentation de l'espace à partir i) d'autres modalités sensorielles (proprioceptive, vestibulaire ...) fournissant des signaux de vitesse ou d'accélération, ii) d'une perception du temps passé à se déplacer et iii) de l'effort perçu. A ce

titre, les tâches de complétion de trajet nécessitent également de mettre en jeu des mécanismes de *path integration*.

II -3.3.1.3.Le modèle d'encodage de l'erreur ...

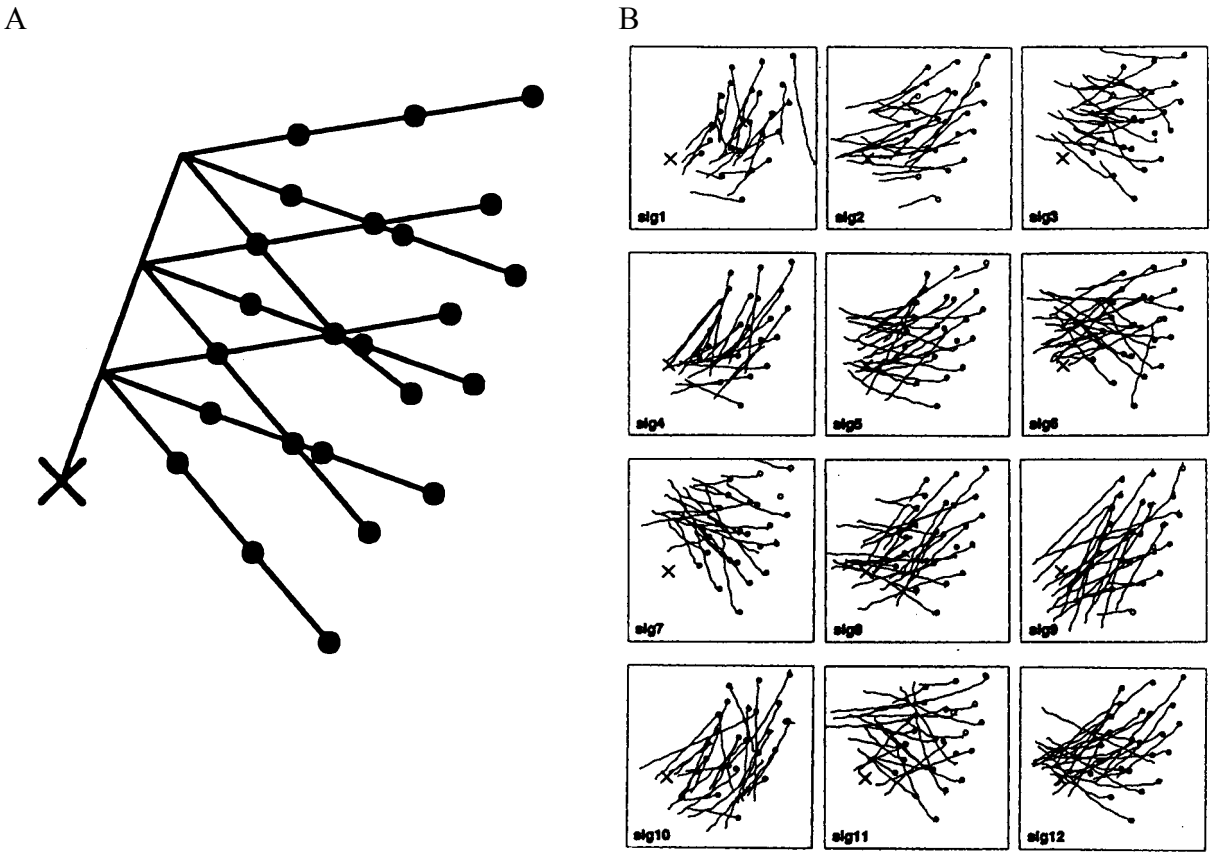


Figure II-14 : A) 27 formes triangulaires sont constituées par combinaison de 3 longueurs pour le premier côté (2, 4 et 6 m), trois longueurs pour le deuxième côté (2, 4 et 6 m) et trois angles (60°, 90° et 120°). Après avoir été guidé sur les deux premiers côtés, le sujet doit revenir à sont point de départ (matérialisé par la croix). B) Trajet retour de 12 sujets voyants (Loomis et al., 1993).

Les tâches de complétion de trajet ont permis de proposer un modèle d'encodage de l'erreur lors de l'intégration de trajets (Fujita, Klatzky, & Loomis, 1993). Ce modèle se décompose en 3 étapes distinctes i) des processus d'encodage qui nécessitent une représentation interne des limites spatiales du trajet ii) des processus de traitement de la trajectoire requise pour retourner au point de départ iii) des processus d'exécution de la trajectoire. Pour la première étape le modèle postule un codage des distances et des angles dont le sujet a fait l'expérience lors de son trajet aller. D'après les auteurs les erreurs à l'issue du trajet de retour vers le point de départ refléteraient une imprécision systématique de cette procédure d'encodage. Le sujet construirait, dans une procédure d'intégration de trajet, la trajectoire de retour à partir d'une connaissance erronée de sa position. Bien qu'un bruit

aléatoire puisse également intervenir lors des deux dernières étapes Fujita et al. (1993) n'envisagent pas d'erreurs systématiques produites lors du traitement et de l'exécution de la trajectoire de retour. Ce modèle a été validé par comparaison entre ses prédictions et les résultats obtenus par des sujets (Loomis et al., 1993) sur une tâche de complétion de triangles (Figure II-14) construits à partir de 27 combinaisons de longueurs de côtés (2, 4 ou 6m) et d'angles (60, 90 et 120°). Les résultats de ces expériences montrent l'existence d'un effet de gamme pour les erreurs linéaires et angulaires que le modèle résume à 4 paramètres. Ces paramètres permettent de caractériser deux fonctions linéaires d'estimation des distances et d'angles encodés :

$d' = 0.60\ d + 1.2$ ou d est la distance réelle (m) et d' la distance encodée (m) et

$\alpha' = 0.48\ \alpha + 50$ ou α est l'angle réel (°) et α' l'angle encodé (°).

Les valeurs prédictives de ce modèle sont tout à fait en accord avec les phénomènes de surestimation des faibles amplitudes et de sous-estimation des déplacements de grande amplitude déjà mentionnés pour les translations et rotations pures. Par contre, elles s'opposent à l'hypothèse d'une mise à jour des informations de position (linéaire et angulaire) à chaque instant car, si c'était le cas, un mauvais encodage de la vitesse (linéaire et angulaire) devrait conduire à l'établissement d'un rapport constant entre la position encodée et la position réelle.

En utilisant également une tâche de complétion de triangle, Marlinsky (1999c) a étudié la capacité de sujets à reconstruire un trajet de retour au point de départ (orientation et longueur) en absence de vision (Figure II-15).

Il a manipulé la longueur des deux premiers côtés du triangle (2, 3 et 4m), leur orientation (de 30° à 150°) et le mode de déplacement des sujets sur le trajet aller (transport passif *vs* marche guidée). Bien que le mode de déplacement ne soit pas une variable discriminante, les résultats montrent qu'une modification des longueurs des côtés conduit à une dégradation de l'estimation de la longueur du trajet de retour alors que son orientation reste inchangée. Par contre, une modification de l'orientation des côtés du trajet aller conduit à une dégradation concomitante de l'estimation de la longueur et de l'orientation du trajet de retour. Cependant, un modèle prédictif basé sur l'addition géométrique des estimations linéaires (Marlinsky, 1999a) et angulaires (Marlinsky, 1999b) subjectives a permis de s'approcher des données réelles pour un sujet. Ce modèle, même s'il ne s'ajuste pas exactement au comportement du sujet, met en évidence les tendances à la déviation et la dégradation de la longueur du trajet de retour.

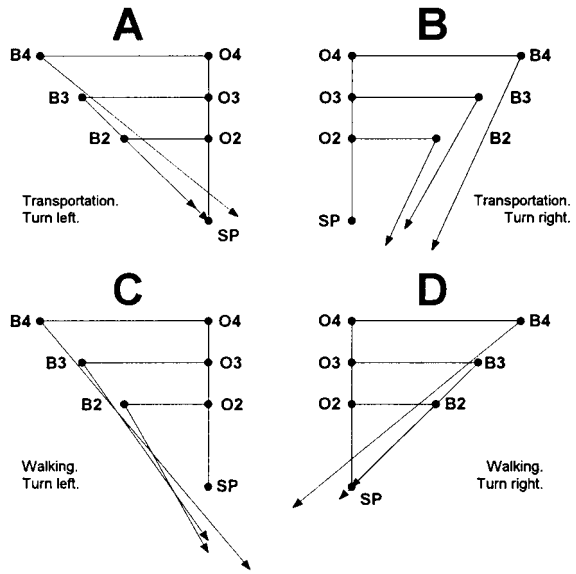


Figure II-15 : Reconstruction de la base subjective de triangles après un déplacement passif ou actif de 4, 6 ou 8 mètres entrecoupé d'une rotation à angle droit vers la gauche ou vers la droite (Marlinsky, 1999c).

II -3.3.1.4.... et quelques unes de ses limites

Le modèle d'encodage de l'erreur est exclusivement basé sur une représentation égocentrique des positions du sujet qui se déplace. Il ne tient pas compte de la position générale du trajet parcouru dans l'espace environnant. L'absence de référence externe force les sujets, lors des répétitions successives, à coder leur position par rapport au trajet lui-même et non par rapport à des référentiels externes. Or l'application du modèle à des données expérimentales issues de trajets plus complexes qu'une simple complétion de triangle (Klatzky et al., 1990; Klatzky et al., 1997) a montré qu'il pouvait perdre une partie de son pouvoir prédictif. Sur ces nouvelles données, on retrouve le caractère linéaire des fonctions d'encodage de l'erreur avec une ordonnée à l'origine positive et une pente inférieure à 1. Cependant, les paramètres du modèle initial (Fujita et al., 1993) ne permettent pas un bon ajustement aux données et Klatsky et al. (1999) trouvent des valeurs différentes selon qu'ils manipulent la longueur des côtés ou l'angle du trajet aller :

$d' = 0.52\ d + 0.66$ m	encodage de la distance, manipulation de la longueur
$\alpha' = 0.82\ \alpha + 0.8$ °	encodage de l'angle, manipulation de la longueur
$d' = 0.60\ d + 0.55$ m	encodage de la distance, manipulation de l'angle
$\alpha' = 0.86\ \alpha + 0.1$ °	encodage de la l'angle, manipulation de l'angle

L'ajustement moins précis aux données expérimentales suggère la participation de processus de niveau élevé basés sur la mémoire de la configuration à parcourir. De plus, l'expérience passée des sujets semble affecter le processus d'intégration de trajets même si leur adaptation peut intervenir à moyen terme. Par conséquent, il faut envisager que plusieurs types d'encodages puissent être utilisés en rapport avec l'expérience des sujets et que plusieurs fonctions puissent être calculées pour un même trajet ce qui revient à reconnaître la simplicité et les limites du modèle originel dont les postulats de base (génération de l'erreur lors de l'encodage des distances et des angles dans un système de représentation égocentré) ne sont pas remis en cause. D'ailleurs Glasauer et al. (2000) ont pu également modéliser la performance de sujets sains et de patients labyrinthiques dans une tâche de complétion de triangle à partir des erreurs de codage des translations et des rotations. Leur modèle a permis de montrer la dissociation des deux types d'erreurs.

II -3.3.2.Déplacements circulaires

Nous entendons ici par déplacements circulaires les déplacements locomoteurs impliquant une rotation dont le centre n'est pas la position actuelle du sujet. Ils comprennent toutes les situations locomotrices où le centre de rotation de la trajectoire est éloigné du sujet. Ce centre de rotation peut être fixe dans le cas d'un cercle ou mobile dans le cas de trajectoires elliptiques ou plus généralement sinueuses. Pour le sujet, il ne s'agit plus de "*tourner sur place*" mais de "*tourner autour*" d'un point ou d'un obstacle qui peuvent être réels (par exemple un piquet de slalom en ski) ou virtuels (par exemple lors d'une course d'élan en saut en hauteur).

II -3.3.2.1.Rôle des entrées sensorielles

L'intégration de trajets et la mémoire motrice des déplacements en rotation lors de la marche ont été testées dans de nombreuses situations de marche sur un trajet circulaire (Figure II-16) préalablement observé par des sujets sains (Takei et al., 1997; Takei, Grasso, & Berthoz, 1996) ou atteints de lésions vestibulaires (Takei et al., 1996).

Chez les sujets sains, les principaux résultats font apparaître que des trajectoires circulaires peuvent être générées à partir d'une mémoire spatiale et/ou motrice mais qu'elles nécessitent l'intervention de mécanismes de contrôle cognitif plus sophistiqués que le simple traitement automatique des entrées sensorielles. Enfin, des informations sensorielles différentes ou des modes de traitement différents sont impliqués d'une part dans l'estimation de la courbure et de la longueur du trajet parcouru et, d'autre part dans l'estimation de la

rotation totale. Les résultats obtenus chez un patient vestibulaire ont montré une forme de trajet de type polygonal associée à une dissymétrie directionnelle de la tête. La forme de ces trajectoires dépendrait du sens de rotation du sujet par rapport à son côté lésé. En particulier, le rayon de courbure aurait tendance à être réduit lors d'une rotation vers le côté lésé du fait d'une diminution du tonus musculaire du côté ipsilatéral dû à l'absence d'entrées vestibulaires. Ce phénomène pourrait perturber l'utilisation des stratégies anticipatrices de la direction de la tête liées à la fréquence du cycle locomoteur et au rayon de courbure de la trajectoire (Grasso, Glasauer, Takei, & Berthoz, 1996).

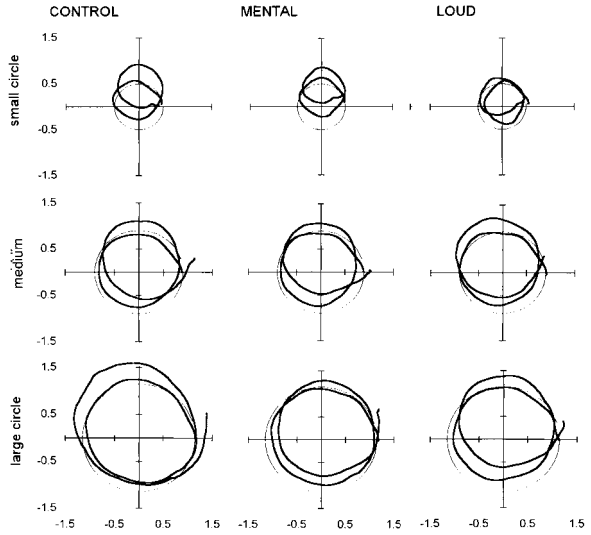


Figure II-16 : Exemples de résultats obtenus par Takey et al. (1997) pour une tâche de marche circulaire (2 tours) effectuée sans vision pour trois tailles de cercles (0.5, 0.9 ou 1.15 m de rayon) et avec une tâche cognitive additionnelle (comptage mental à rebours ou à haute voix).

Dans une série d'expériences, Ivanenko et al. (1997a; 1997b) ont réalisé une estimation du rôle des entrées vestibulaires dans la perception d'un déplacement bi-dimensionnel passif de l'ensemble du corps dans le plan horizontal. Ils ont utilisé une tâche de reproduction de déplacements passifs appliqués à des sujets assis en absence de vision sur un robot mobile télécommandé. Ils ont également proposé pendant le déplacement du robot une tâche de poursuite manuelle d'une cible immobile mémorisée. Les formes de déplacement consistaient en une rotation pure sur place, une ligne brisée et un arc de trajectoire circulaire pour lesquelles la quantité de rotation était de 45°, 90°, 135° ou 180° (Ivanenko, Grasso, Israël, & Berthoz, 1997a). Les résultats ont montré que les sujets surestiment leur angle de rotation de 28 ± 11 % en condition de reproduction alors qu'ils adaptent finement la direction de leur pointeur vers la cible en condition de poursuite manuelle. Les auteurs suggèrent que le système nerveux central est capable de discriminer finement les composantes angulaires d'un

déplacement du corps entier dans le plan horizontal même s'il existe une variabilité importante entre les sujets lorsque les otolithes étaient stimulés (trajectoires en coin et arcs de cercles). Ils montrent également que les déplacements angulaires peuvent être transformés dynamiquement en mouvement de pointage adaptés.

II -3.3.2.2.Orientation par rapport à la trajectoire

Dans un travail complémentaire (Ivanenko, Grasso, Israël, & Berthoz, 1997b) où le siège sur lequel est assis le sujet subit des rotations indépendantes de la forme circulaire ou linéaire de la trajectoire du robot lui-même, les interactions entre les canaux semi-circulaires et les otolithes ont été étudiées. Les résultats ont montré que dans la gamme d'accélération linéaire utilisée (0.1 g), on enregistre peu d'incidences des entrées otolithiques sur la perception du déplacement angulaire quand celui-ci met principalement en jeu les canaux semi-circulaires. Par ailleurs les sujets ont produit des reconstructions de trajectoires bi-dimensionnelles plus précises lorsque la direction du déplacement correspondait à chaque instant à la direction du corps. Ivanenko et al. (1997b) suggèrent donc que la stabilité de la configuration de l'orientation du corps par rapport à la direction du déplacement est une contrainte physiologique sur laquelle s'appuie le système nerveux central lors de déplacement dans le plan horizontal. L'orientation relative du corps et du déplacement peut moduler les sorties attendues de modélisations mathématiques basées sur des transformations simples des entrées linéaires et angulaires.

II -3.3.2.3.Quels modèles pour les déplacements locomoteurs circulaires et elliptiques ?

Comme on l'a vu les déplacements locomoteurs composés d'arrangements de translations et de rotations pures peuvent être modélisés sur la base des erreurs de positions par rapport à certains points particuliers du parcours où il s'agit de changer de direction. Ce type d'approche, dédiée à des cas où la courbure de la trajectoire est nulle s'applique difficilement à une courbure non nulle qui, de plus, pourrait varier tout au long du déplacement comme c'est le cas pour les trajets circulaires ou elliptiques. Ce type de déplacement locomoteur très particulier n'a pas encore donné lieu à un grand nombre d'études comportementales chez l'homme. A notre connaissance, il n'existe pas actuellement de modèle prédictif issu de données réalistes pour ce type de trajectoires locomotrices. C'est la raison pour laquelle nous nous attacherons à identifier les modèles permettant de rendre compte des caractéristiques des trajectoires circulaires et elliptiques sans pour autant avoir

l'ambition d'en faire ici une revue exhaustive et en gardant à l'esprit que la plupart d'entre eux ont été élaborés à partir de mouvements du membre supérieur uniquement.

II -3.3.2.3.1.L'approche de la programmation motrice ...

Dans leur version extrême, les théories de la programmation motrice favorisent l'idée d'une représentation centrale d'une séquence d'actions motrices conduisant à la production d'un mouvement en l'absence de feed-back (Keele, 1968). Cependant la généralisation et la flexibilité des programmes est rendue possible par la distinction entre des aspects structuraux de l'action souhaitée et des paramètres (Schmidt, 1975). Les premiers, dont la nature reste incertaine, seraient invariants et stockés en mémoire alors que les seconds (synergies musculaires, durées, forces ...) seraient spécifiés au cas par cas au moment de l'exécution de l'action. Cependant, selon cette approche, une représentation interne de la trajectoire voulue est nécessaire au stade de l'implémentation avant de pouvoir l'exécuter. Plus précisément, les relations spatiales observées sur le comportement résultant sont supposées rendre compte par un isomorphisme direct (dont la nature semble toutefois délicate à établir) de composants identifiables de cette représentation interne. La forme géométrique de certaines parties de trajectoires ou les caractéristiques temporelles communes de certains mouvements sont interprétées comme une indication tangible des caractéristiques de la planification motrice.

II -3.3.2.3.2. ... et les autres approches

En termes calculatoires, le nombre élevé de degrés de liberté définis comme le nombre minimal de coordonnées permettant de décrire le système musculo-squelettique rend les opérations de contrôle très coûteuses (Saltzman, 1979; Bernstein, 1967). Pour Bernstein (1967) la coordination du mouvement correspondrait au "processus de maîtrise des degrés de liberté redondants d'un organe en déplacement, en d'autres termes sa conversion en système contrôlable". De plus, la production d'une trajectoire donnée peut être obtenue par la mise en jeu de patrons d'activation musculaire différents ce qui offre un grand nombre de solutions pour résoudre la tâche (Hebb, 1949). Pour aborder ce problème, certaines approches privilégient le fait que la sortie motrice dans ses aspects tant cinématiques que géométriques est spécifiée sur la base de principes simples qui régissent le fonctionnement du système de contrôle moteur. Des relations non univoques entre la commande du mouvement et la sortie motrice en termes de forces exercées par les muscles sur les articulations sont envisagées. Elles visent à geler les degrés de liberté pour pouvoir ensuite les relâcher progressivement (Vereijken, Van Emmerik, Whiting, & Newell, 1992).

Les principes de la dynamique des systèmes non linéaires peuvent être utilisés pour expliquer et modéliser le mouvement. Ils établissent les modalités de passage entre deux états stables de coordination en résumant l'activité du système à l'aide du décours temporel de variables collectives. Celles-ci représentent quantitativement et dans un espace de plus faible dimension les relations d'ordre entre les différents composants du système. Cette approche a été utilisée pour caractériser des structures coordinatives lors de la production de mouvements rythmiques ou discrets (Saltzman & Kelso, 1987; Kugler & Turvey, 1988; Denton & Diamond, 1991; Beek, Peper, & Stegeman, 1995).

La notion d'efficience se retrouve dans les approches qui cherchent à minimiser une fonction de coût (Uno, Kawato, & Suzuki, 1989; Flash & Hogan, 1985; Osu, Uno, Koike, & Kawato, 1997 pour une revue). Ici encore, le principe d'un contrôle optimal est avancé et il n'existe pas de prototype préétabli de la production motrice. Le système est supposé produire une trajectoire qui dévie le moins possible de la trajectoire idéale. Dans des modèles de ce type, la prise en compte de la déviation totale et des contraintes issues des propriétés dynamiques du système neuromusculaire suffisent à spécifier la loi de mouvement. En principe ces modèles basés sur la minimisation d'une fonction de coût permettent de produire des mouvement fluides et gracieux.

II -3.3.2.4.Géométrie et cinématique

Comme le rappelle Viviani (1991) il existe plusieurs méthodes pour décrire le mouvement d'un point dans le plan quand celui-ci est représenté dans un système de référence extrinsèque. Il en présente trois ... non exclusives d'autres possibilités (Figure II-17).

Premièrement, le mouvement peut être décrit en fournissant le décours temporel des coordonnées du point considéré. Dans ce cas le système se résume à deux fonctions de forme $x = x(t)$ et $y = y(t)$. Deuxièmement, il peut être décrit lorsque sa forme géométrique (G) et le mouvement (M) sont donnés. Il est alors nécessaire de spécifier un couple d'équations paramétriques pour G tel que $x = x(s)$ et $y = y(s)$ où s est une coordonnée curviligne. Il faut aussi spécifier une loi de mouvement de type $l = l(t)$ qui indique la longueur de trajectoire parcourue à l'instant t après le début du mouvement. Troisièmement, il peut être décrit en spécifiant le rayon de courbure (R) de la trajectoire et la vitesse tangentielle (V) en fonction de la coordonnée curviligne.

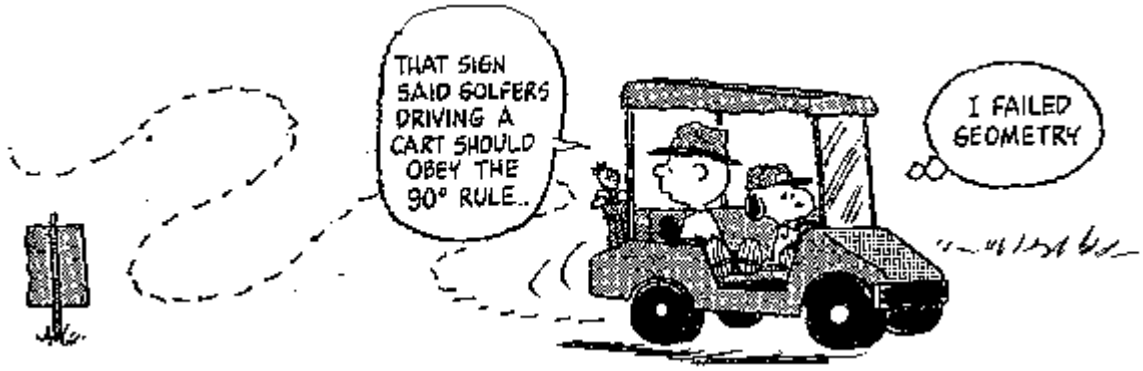


Figure II-17 : Comment spécifier les caractéristiques d'un trajet ...?

A priori, dans le domaine cinématique, aucune relation particulière n'existe entre les paramètres géométriques (*G* et *R*) et les paramètres de mouvement (*M* et *V*). Par conséquent, on peut imaginer qu'une trajectoire soit obtenue à partir de n'importe quelle loi de mouvement ou qu'une même loi de mouvement conduise à des trajectoires différentes pour un point démuni de masse. Pourtant, ce n'est plus le cas dans le domaine dynamique (Viviani, 1991) pour les mouvements des solides qui nous concernent qui, eux, sont toujours pesants. A ce titre ils sont soumis aux lois du mouvement et en particulier la loi de Newton (F = ma) qui établit la relation entre un champ de force et (indirectement) le décours temporel de la position du point. La participation de la loi de Newton à la définition des aspects géométriques et cinématiques de la trajectoire a pour conséquence d'éliminer la possibilité de leur indépendance. Dès lors, s'ils ne sont pas indépendants, se pose la question de la nature de leur relation. En d'autre termes si un principe de relation entre géométrie et cinématique est établi et si ce principe présente une certaine homogénéité pour une catégorie de mouvements générés par un système de contrôle, cette relation reflète le fonctionnement du système lorsqu'il planifie les forces. De ce fait, "toute forme consistante de covariation entre des quantités géométriques et cinématiques est susceptible de fournir une indication pour comprendre la logique du contrôleur" (Viviani & Flash, 1995).

II -3.3.2.5.Un exemple de loi mouvement : "La loi de puissance 2/3"

Les premières observations scientifiques sur les variations mutuelles de la vitesse et de la courbure des trajectoires lors de mouvements de traçage manuel sont déjà anciennes (Binet & Courtier, 1893; Jack, 1895 cités par Wann et al. ; 1988). On sait depuis la fin du 19° siècle que la vitesse du tracé dépend du rayon de courbure de telle sorte que la vitesse de l'effecteur augmente dans les parties peu courbées de la trajectoire et qu'inversement elle diminue

fortement dans les parties très courbées. Dans les dernières années de nombreux travaux ont été consacrés à l'étude de la structure fine des relations entre vitesse et courbure du mouvement (Viviani & Terzuolo, 1980; Lacquaniti, Terzuolo, & Viviani, 1983; Viviani & Terzuolo, 1982; Viviani, 1986; Viviani & Schneider, 1991; Viviani & Cenzato, 1985). La version originale de la formalisation mathématique de la relation entre les aspects géométriques et cinématiques a été donnée par Lacquaniti et al. (1983) à partir de l'enregistrement de mouvements de dessins de formes elliptiques ou de formes plus complexes. Ces auteurs ont montré, pour des classes de mouvements particuliers (sous unités de trajets ne comprenant pas de points d'inflexion) de rayon de courbure R et de vitesse tangentielle V, que la relation peut s'écrire sous la forme :

$A = KC^{2/3}$ avec $C = 1/R$ pour la courbure de la trajectoire

$A = V/R$ pour la vitesse angulaire

ou, de façon équivalente

$V = KR^{1/3}$ ou encore $\text{Log } V = \text{Log } K + 1/3 \text{ Log } R$

ce qui permet de caractériser la production d'un tracé manuel par une analyse de régression linéaire entre les logarithmes du module de la vitesse et du rayon de courbure (Figure II-18).

La loi a été généralisée à des mouvements plus complexes et une nouvelle formulation en a été donnée par Viviani et al. (1991) pour tenir compte de classes de mouvements comprenant des unités motrices identifiées (Viviani, 1986; Viviani et al., 1985), pour s'adapter à des trajectoires comprenant des points d'inflexion et à des variations observées au cours du développement (Viviani et al., 1991).

Wann et al. (1988), en analysant les données d'adultes pour le traçage d'ellipses d'excentricité différente, ont montré que la loi de puissance 2/3 pouvait être expliquée par des modèles prenant en compte le coût du mouvement tels que le modèle du minimum jerk (Flash et al., 1985). Cependant, ils ont du apporter des modifications au modèle initial. Ils ont ajouté une composante visco-élastique au modèle initial et ont adressé une série de remarques critiques quant à la possible modélisation de la loi de puissance 2/3 à l'aide de fonctions de minimisation de coût. En premier lieu, ils suggèrent qu'un grand nombre de mouvements exécutés dans le plan peuvent être considérés comme le résultat du couplage de deux

mouvements harmoniques orthogonaux. Ensuite, y compris dans le cas d'ellipses, on peut trouver des asymétries dans les profils de vitesse qui attestent d'une violation significative de cette loi. De plus, la minimisation d'une fonction de coût en rapport avec le jerk (minimisation de la secousse) impliquerait une modification proportionnelle des covariations entre rayon de courbure et vitesse.

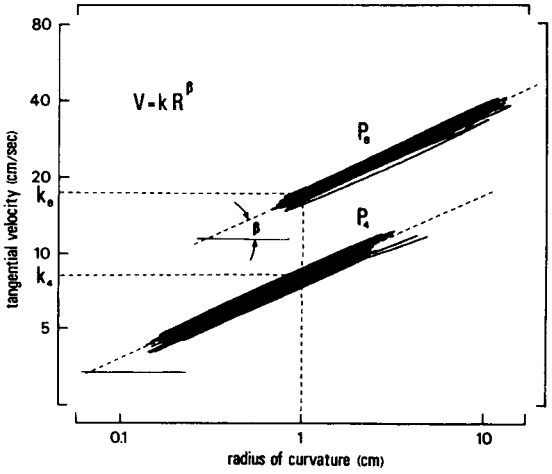


Figure II-18 : Expression de la loi de puissance 2/3 (Viviani et al., 1991) : Relation entre les logarithmes du rayon de courbure et du module de la vitesse de la main lors du traçage d'ellipses de périmètre 6.63 cm (P4) et 26.51 cm (P8).

Viviani et Flash (1995) ont comparé les deux approches et tenté de déterminer la stratégie privilégiée par le système nerveux central pour contrôler le grand nombre de degrés de liberté du membre supérieur. En fait, il s'avère que les stratégies consistant à contrôler les covariations de paramètres cinématiques du mouvement ou à utiliser les paramètres d'une fonction de contrôle optimal se recoupent. Bien que le contrôle optimal de la trajectoire permette de prédire la loi de puissance 2/3 sans restituer l'isochronie globale du mouvement, les auteurs s'accordent pour reconnaître que "planifier un mouvement est possible en se conformant à un principe d'optimisation" et qu'en même temps "le plan est représenté de façon interne avant d'être implémenté".

Des confirmations expérimentales de l'existence de cette loi, initialement établie pour des mouvements de graphisme réalisés dans un plan par le membre supérieur, ont été apportées dans le domaine du graphisme en 3D (Soechting, Lacquaniti, & Terzuolo, 1986), des déplacements passifs de la main (Viviani, BaudBovy, & Redolfi, 1997), de la génération des paramètres dynamiques du mouvement de la main (Massey, Lurito, Pellizzer, & Georgopoulos, 1992), de la production des mouvements oculaires (Viviani & Velay, 1987) et

même de la perception visuelle (Viviani & Stucchi, 1989; Viviani & Stucchi, 1992). Dans ce dernier cas par exemple, il a été montré que la forme d'un trajet objectivement circulaire pouvait être perçue comme elliptique si la diode qui le parcourt, observée par le sujet, suit une loi de mouvement conforme à la loi de puissance 2/3. Inversement, la vitesse d'une diode se déplaçant à vitesse constante est perçue correctement si elle se déplace sur un cercle alors que des accélérations et décélérations sont perçues si elle se déplace sur une ellipse. Les erreurs perceptives sont tout à fait en accord avec la loi de puissance 2/3 et les auteurs interprètent leurs résultats comme la manifestation d'interactions perceptivo-motrices. Même en absence de toute intention de produire le mouvement, certaines propriétés du système moteur influencent de façon implicite l'interprétation perceptive du stimulus visuel.

Les origines neurales de la loi sont encore mal connues. A l'heure actuelle, deux types de théories ont été proposées. Les premières privilégient des hypothèses de programmation centrale, voire des mécanismes corticaux pour expliquer la planification du mouvement (Massey et al., 1992; Pellizzer, 1997; Pellizzer, Richter, & Georgopoulos, 1999) alors que les secondes sont plus favorables à l'intervention de facteurs d'origine périphérique (Wann, Nimmo-Smith, & Wing, 1988; Harris & Wolpert, 1998; Gribble & Ostry, 1996; Sternad & Schaal, 1999). Pour autant, il est difficile actuellement de trancher la question de l'origine de cette loi qui pourrait être la conséquence d'un mouvement perçu ou produit à vitesse constante dans l'espace affine (Pollick & Sapiro, 1999).

II -4. Déplacer son corps dans un espace imaginé : un problème d'harmonie entre l'expérience sensible de l'espace et des images mentales

Nous avons vu que la navigation dans l'espace de déambulation met en jeu une série de capteurs délivrant des signaux sensoriels utilisés par le sujet pour reconstruire sa position dans l'espace. Cette connaissance peut être complétée par l'utilisation de systèmes de représentations symboliques au rang desquels figurent les cartes (cognitives ou géographiques) mais les trajectoires adoptées répondent à certaines lois de mouvement auxquelles le sujet semble ne pas pouvoir se soustraire. Nous allons donc tenter de comprendre en quoi une représentation symbolique imagée peut influencer les capacités de navigation (Figure II-19).

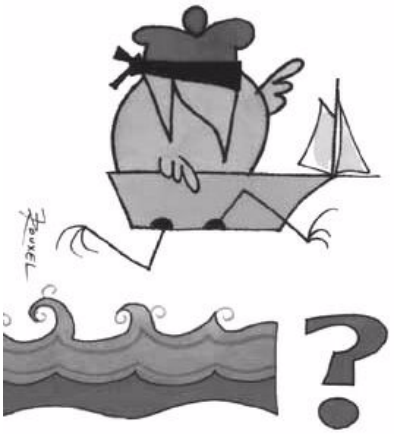


Figure II-19 : Les Shadoks, fin navigateurs, n'hésitaient pas à recourir aux images mentales ...

II -4.1.Définitions

L'image est une forme particulière de représentation mentale qui permet à l'esprit humain de manipuler l'information issue de l'environnement. Cette modalité de représentation possède des propriétés et des fonctions qu'elle partage avec d'autres systèmes de représentation du réel. Nous retiendrons principalement trois propriétés des systèmes de représentation. Denis (1989) mentionne la *conservation* des relations entre les éléments de l'objet représenté au sein même de l'entité qui le représente, c'est-à-dire d'une certaine correspondance que l'on entrevoit aisément dans le cas de représentations graphiques telles que des dessins ou des schémas mais qui peuvent également exister pour les images mentales. Cependant, il insiste également sur la *transformation* qui ne manque pas de s'opérer et qui conduit à un changement de nature entre l'objet de départ et l'objet représenté. En particulier,

les différences entre les deux objets peuvent être provoquées par des différences de codage et seraient en rapport avec leur degré de similitude structurelle. Enfin, une partie de l'information contenue dans l'objet initial est perdue lorsque cet objet est représenté. Cette *réduction* est fondamentale au plan théorique pour connaître la nature et les mécanismes d'intégration de certaines primitives de l'objet qui seront incluses dans la représentation. Elle est également utile au plan pratique. En fournissant une information plus ou moins résumée selon les besoins, elle peut faciliter la compréhension de structures complexes. Par exemple, dans le domaine de la navigation, les cartes ou les plans urbains, sont des exemples représentés de l'information nécessaire pour se situer et se déplacer dans un environnement donné. Il est bien évident, qu'ils ne nécessitent pas le même degré de résolution, selon que l'on souhaite faire le tour d'un pâté de maisons ou traverser la ville.

Le renouveau récent de l'intérêt porté à l'activité d'imagerie a également donné lieu à des controverses sur la nature du codage de l'information. (Kosslyn, 1980; Kosslyn, 1996 pour des revues). Retenons de ce vif débat que la représentation imagée pourrait prendre des formes variées. Une première hypothèse retient l'idée d'une imagerie mentale amodale et inséparable d'autres activités de nature propositionnelle. Toute l'information, indépendamment de sa modalité sensorielle d'origine, serait résumée sous une seule entité abstraite dont le fonctionnement reposerait sur des opérations de manipulation de symboles comme il peut en exister pour le langage (Pylyshyn, 1973). Une deuxième hypothèse a été soutenue par Paivio (Paivio, 1986) qui envisage la possibilité de plusieurs codes de traitement (au moins deux), l'un étant dédié à la représentation des images mentales et l'autre pour les propositions symboliques. Il a été proposé par Kosslyn (1980) que les images mentales sont des représentations analogiques ou quasi picturale des objets et des événements alors que des représentations symboliques discrètes sous-tendent le langage.

Si l'on retient cette dernière hypothèse, il est tout à fait concevable de parler d'images mentales visuelles, bien sûr, mais aussi d'images auditives ou motrices. En fait, la notion d'image mentale fait appel à la possibilité pour un individu d'évoquer mentalement des événements auditifs, visuels ou moteurs en l'absence de toute stimulation sensorielle. Par exemple, il vous est sans doute possible de former l'image visuelle de la fameuse locomotive entrant dans la gare de La Ciotat même si vous ne vous trouvez pas à La Ciotat actuellement ni dans une gare ou dans une salle de cinéma. Mais, de façon plus inattendue, vous parviendrez aussi à "entendre" le bruit du train ou "sentir" l'odeur du charbon et des machines fumantes. Enfin, pour peu que vous soyez amateurs de voyages (fussent ils imaginaires) vous

n'aurez aucune difficulté à imaginer le mouvement du voyageur qui doit hisser ses bagages du quai vers le wagon et y trouver une place pour continuer sa route (Figure II-20).



Figure II-20 : Arrivée du train à La Ciotat (Lumière, 1895)

Cependant, notre propos sera principalement orienté sur les images visuelles et motrices car ce sont celles qui sont principalement mises en oeuvre dans les tâches de navigation que nous étudions.

II -4.2.Quelques propriétés des images visuelles

Des images quasi picturales sont particulières car elles semblent dessiner ou photographier l'information contenue dans la scène ou l'objet évoqué. La métaphore parfois trop simple qui voudrait que les images mentales visuelles soient assimilées à des photos est probablement inadaptée. En effet, si des photos sont considérées comme des formes de représentations dont une des fonctions est de refléter "trait pour trait" le réel, on voit difficilement comment distinguer l'imagerie de la perception visuelle qui, elle aussi, doit être fidèle à la réalité. Par conséquent, il est sans doute vain de considérer l'imagerie comme un simple rappel en mémoire à long terme de percepts. Le problème central devient donc d'établir dans quelle mesure l'imagerie reflète les propriétés des objets réels ou dans quelle mesure elle s'en éloigne.

Les images se présentent sous la forme d'un médium spatial interne qui possède une métrique (éventuellement euclidienne). Cela signifie que les propriétés de séparation et d'éloignement sont préservées. Les images sont formées en modifiant les propriétés locales de certains régions du médium interne et le patron formé est une sorte de carte topographique de la scène ou de l'objet imagés. A ce titre, chaque portion locale de l'image correspond à une portion de l'objet représentée depuis un point de vue particulier et les relations d'intervalle entre des parties de l'image représentent implicitement les distances des intervalles entre les parties de l'objet représenté. Cela implique que chaque portion de l'image est une représentation d'une portion de l'objet et qu'il est impossible de décrire une forme dans une

image sans décrire également des orientations et des tailles apparentes. De plus, les symboles utilisés pour former une image ne sont pas choisis arbitrairement.

Les images visuelles possèdent également des propriétés liées aux aspects surfaciques de l'objet tels que sa texture, sa luminance et sa couleur. Par exemple, cela signifie que chaque couleur d'une portion de l'image est une représentation de la couleur d'une portion de l'objet et qu'il est impossible de décrire une couleur ou une texture dans une image sans décrire également une certaine forme de l'objet. Enfin, le couplage des intensités représentées et des intensités sensorielles perçues n'est pas arbitraire. Une métrique (éventuellement linéaire) est définie et toute valeur représentée de l'intensité d'une propriété de surface doit s'inscrire entre les bornes (minimum et maximum) de cet espace des intensités représentées.

II -4.3.Déplacement et images visuelles

II -4.3.1.Déplacements linéaires

Lea (1975) a enregistré les durées nécessaires pour que des sujets explorent mentalement des images et rappellent le premier, deuxième et énième lieu dans une direction donnée à partir d'un lieu de départ. Les lieux sont appris par présentation d'une liste ou présentation d'un dessin de l'espace. Ses résultats indiquent que la présentation visuelle permet aux sujets d'accéder plus rapidement à l'information sur le énième lieu que la présentation auditive comme si on ne pouvait récupérer le lieu dans la liste qu'après l'avoir effectivement visualisé. De façon plus surprenante ces résultats indiquent aussi que le facteur déterminant le temps pour atteindre l'arrivée est le nombre de lieux intermédiaires depuis le départ. Par contre, il semble que la distance entre le départ et l'arrivée n'intervienne pas. Cependant il n'est pas certain que les sujets n'aient pas effectué un double codage de la liste et de l'image car pour répondre aux exigences de la tâche ils devaient compter le nombre de lieux plutôt que de restituer le décours temporel de leur apparition.

Dans une série d'expériences, Kosslyn et al. (1978) ont utilisé des tâches d'inspections visuelle d'images mentales (*scanning*) et mis en évidence certaines propriétés analogiques de préservation des ratios de distance contestant ainsi le modèle proposé par Lea (1975). L'hypothèse d'un codage spatial de l'image plutôt que celle d'un codage ordinal d'une liste de lieux est validée par les résultats de la première expérience sur des listes de lettres composant un mot où les auteurs montrent un effet sur le temps d'inspection visuelle du nombre de lettres mais aussi de leur écartement spatial. Elle est ensuite renforcée de façon spectaculaire par les résultats de la seconde. Dans cette expérience les auteurs ont mis en place une carte

représentant une île et, sur cette île, sept lieux spécifiques (une plage, une hutte, une mare, un puits, un arbre, un marais et un rocher) créant ainsi 21 paires de points (Figure II-21). Par construction, la distance séparant chaque paire de lieux n'était jamais la même avec une différence minimale de 0.5 cm entre des distances voisines. Après s'être assuré que les sujets avaient une connaissance suffisamment précise des positions des lieux sur la carte, leur tâche consistait à inspecter mentalement la carte et à estimer la durée du déplacement en ligne droite d'une tache noire entre chaque paire de lieux. Les résultats montrent l'existence d'une très forte corrélation entre le temps de réponse et la distance physique qui sépare les lieux sur la carte de telle sorte qu'il faut plus de temps pour estimer mentalement la durée entre des lieux physiquement éloignés qu'entre des lieux rapprochés.

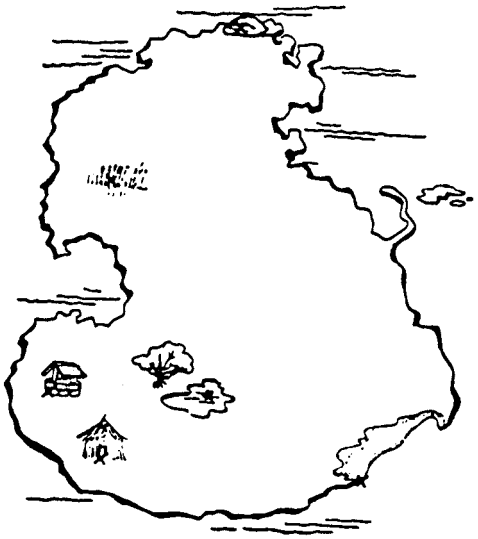


Figure II-21 : Ile imaginaire utilisée lors de la seconde expérience de Kosslyn et al. (1978).

Le principe de cette expérience a été repris à plusieurs reprises. Par exemple, une île possédant des lieux remarquables a été utilisée pour tester la robustesse de l'inspection mentale et les propriétés métriques d'images visuelles générées à partir de descriptions verbales (Denis & Cocude, 1997) ou pour analyser l'activité cérébrale pendant l'inspection d'images mentales visuelles (Mellet, Tzourio, Denis, & Mazoyer, 1995).

II -4.3.2.Déplacements en rotation

La mesure du temps de réaction a également été appliquée au cas de la rotation mentale. Shepard et al. (1971) ont montré que le temps nécessaire pour juger si deux objets orientés différemment sont identiques est une fonction de l'angle physique réellement formé par ces deux objets (Figure II-22). Plus précisément, la décision sera prise dans un temps qui

augmentera de plus en plus avec l'angle jusqu'à atteindre un pic à 180° et diminuer de nouveau entre 180° et 360°. Ce travail pour lequel les objets étaient physiquement présents lors des opérations de décisions a été prolongé par d'autres expériences où il s'agissait de comparer deux objets en mémoire.

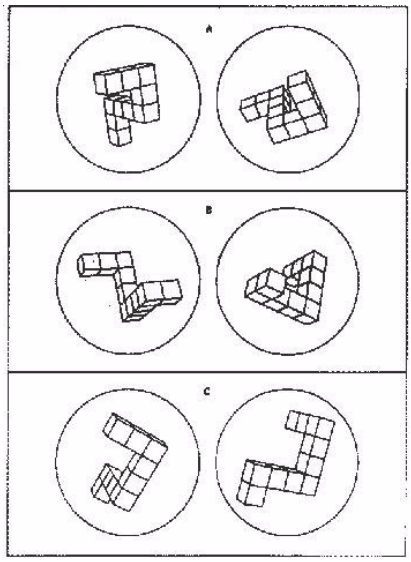


Figure II-22 : Stimuli utilisés par Shepard et al. (1971) pour établir la relation entre temps de réaction et orientation des objets.

Cooper et al. (1973) ont présenté des lettres ou des chiffres asymétriques (F, R, 2, 5 etc.) dans leur position de lecture habituelle puis ils ont présenté les mêmes caractères dans leur sens de lecture habituel (de gauche à droite) ou en sens inverse en leur ayant fait subir une rotation (Figure II-23). Les variables manipulées étaient essentiellement le sens de présentation des caractères, la quantité de rotation et une sorte de mise en alerte du sujet au moyen de conditions qui le prévenaient soit de la nature du caractère qui allait apparaître, soit de son orientation, soit des deux. Les principaux résultats ont montré que lorsqu'une information mixte est donnée (identité et orientation du caractère) le temps de réaction est bref (≈ 400 msec) et n'est pas affecté par l'orientation du stimulus. Par contre, dès qu'une partie de l'information préalable est supprimée, le temps de réaction est affecté par la valeur de la rotation subie par le stimulus avec un pic très marqué à 180°. De même, dans une condition de contrôle pour laquelle aucune information n'était donnée au sujet, le temps de réaction augmente de 600 msec à 1.1 seconde pour des orientations de 0 à 180° pour diminuer ensuite et reprendre sa valeur initiale à 360°.

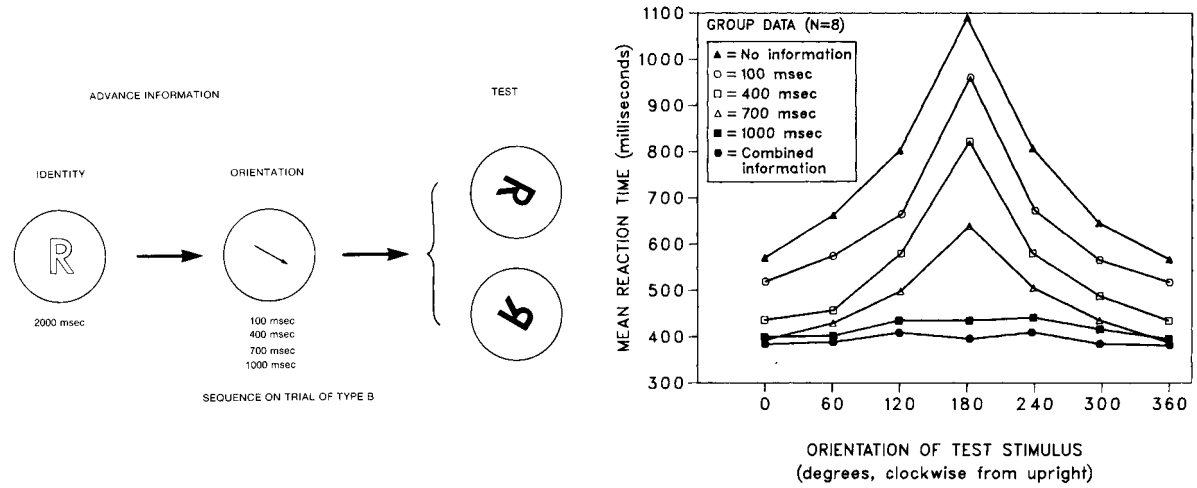


Figure II-23 : Protocole de l'expérience de Cooper et Shepard (1973).

Comme pour l'estimation des distances, l'estimation des valeurs angulaires dans les images mentales abordée lors de ces expériences princeps a donné lieu à de multiples travaux ultérieurs tant comportementaux (Desperati & Stucchi, 1997; Leone, Taine, & Droulez, 1993) que neurophysiologiques (Pellizzer, 1996; Georgopoulos & Pellizzer, 1995; Georgopoulos, Lurito, Petrides, Schwartz, & Massey, 1989).

Farrell et al. (1998) ont étudié la mise à jour des relations spatiales égocentrées en demandant à des sujets de pointer des cibles vues avant la rotation du corps. Dans une première condition les sujets devaient mettre à jour leur position par rapport à la cible en cours de rotation alors que dans une deuxième condition ils devaient attendre la fin de la rotation en imaginant avoir gardé leur orientation initiale. Alors que les temps de latence étaient peu affectés par l'amplitude de la rotation dans la première condition, ils augmentaient dans la deuxième en fonction de la différence entre la nouvelle position des sujets et leur orientation initiale. Dans ce cas, les auteurs envisagent un mécanisme de mise à jour des informations de rotation qui interviendrait automatiquement et qu'il faudrait ensuite contrebalancer par une opération de rotation mentale pour répondre aux exigences de la tâche.

Amorim (1997) rappelle que la rotation d'une scène ou la rotation du sujet autour de cette scène sont deux opérations équivalentes du point de vue des rapport mutuels qu'entretiennent l'objet observé et l'individu. Mais on parlera plus volontiers de rotation mentale dans le cas d'un sujet immobile imaginant un objet en rotation alors qu'un sujet tournant autour d'un objet immobile effectue un changement de point de vue. De façon spontanée, la rotation mentale s'applique à des objets de petites tailles dont certains peuvent être manipulés (par exemple un livre) alors que le changement de point de vue est favorisé pour des objets massifs que l'on ne peut pas faire tourner (par exemple une maison). Par

ailleurs, si l'on admet que le traitement de la rotation s'effectue sur un mode calculatoire, il sera plus simple d'effectuer une translation qu'une rotation dans un système de coordonnées cartésienne et l'inverse se produira dans un systèmes de coordonnées polaires. La fonction du système de coordonnées et du cadre de référence semble prédominante dans ce type de tâches (Wraga, Creem, & Proffitt, 1999). Amorim et al. (1997) ont étudié la mise à jour des informations spatiales qui accompagnent le changement de point de vue ou la rotation d'un objet. Pour cela ils ont comparé deux mode d'exploration mentale d'une montre dessinée sur le sol. Le premier mode est appelé centré sujet (*VC*) et le second centré objet (*VO*). Après avoir présenté sur un écran d'ordinateur un F majuscule pointant dans différentes directions et contrôlé les effets de perspectives il a été demandé aux sujets soit de donner l'heure indiquée par le F en fonction de leur position sur le cadran (*VC*) soit de donner leur position sur le cadran en fonction de l'heure pointée par le F (*OC*). Classiquement, les résultats montrent des délais de réponse proportionnels à l'angle à parcourir lors de l'exploration imaginaire de la scène visuelle. D'ailleurs, ces délais augmentent avec la taille du cadran (3m *vs* 30 m). De façon plus surprenante, la condition *OC* nécessite en moyenne 2 secondes de plus que la condition *VC*. Les auteurs considèrent que ces résultats sont en accord avec les théories de l'inspection des images mentales (*mental scanning*) basées sur une représentation visuelle. Après avoir rejeté les hypothèses propositionnelles, ils proposent un modèle inspiré de celui de Kosslyn (1996 - p. 383) pour une approche neuro-cognitive de la navigation humaine (Amorim, 1999). Dans ce modèle une part importante est dévolue au mappage spatiotopique qui est l'étape de traitement intermédiaire entre les entrées multisensorielles et le codage en terme de coordonnées (distance et direction) ou de catégories topologiques (à côté, plus haut, à gauche, etc.). A ce stade du modèle, l'information peut être codée relativement à l'observateur (mappage égocentrique) ou à l'environnement (mappage allocentrique). Une information codée de façon égocentrique correspond à une situation de type "le vent me vient du côté gauche" alors que "je navigue vers le large" est un codage de type allocentrique.

En résumé, se déplacer dans une image mentale visuelle prend d'autant plus de temps que la distance à parcourir entre les points de départ et d'arrivée virtuels est importante. Par ailleurs, effectuer mentalement la rotation d'une image visuelle ou déplacer son propre corps autour d'un objet imaginé sont des opérations cognitives qui nécessitent également du temps. Ce temps est en rapport avec la quantité de rotation effectuée tout comme il le serait dans le cas de la rotation d'objets réels.

II -4.4.Images motrices

II -4.4.1.Définitions

Une bonne partie de nos actions est guidée indirectement par la représentation interne de buts au lieu d'être guidées directement par l'environnement externe. Pour les actions motrices cette représentation s'appuie sur l'imagerie motrice définie par Decety (1996b) comme "un état dynamique pendant lequel un sujet simule mentalement une action donnée". Comme pour l'analyse des propriétés des images visuelles, l'existence et la structure de telles représentations motrices a pu être inférée à partir de durées, de temps de réaction ou de patrons moteurs (Jeannerod, 1994 pour une revue). Cependant, alors que l'imagerie visuelle concerne les mouvements des objets inspectés, l'imagerie motrice concerne toujours l'évocation de mouvements du corps propre. Pour ces déplacements spécifiques Mahoney et al. (1987) distinguent "l'imagerie interne" qui est un traitement à la première personne (le sujet est l'acteur de son propre mouvement) impliquant essentiellement une représentation kinesthésique et "l'imagerie externe" qui est un traitement à la troisième personne (le sujet est le spectateur de son propre mouvement) basé sur une représentation visuelle de l'action et de l'espace dans lequel elle se déroule. Se représenter en mouvement, que ce soit pour l'ensemble du corps (navigation) ou certaines de ses parties (graphisme et écriture) exige une représentation du corps comme générateur de forces plutôt que des effets de ces forces sur l'environnement. Le caractère strictement "interne" de cette activité semble l'éloigner très fortement de l'action motrice qui peut être appréhendée et mesurée objectivement par un observateur extérieur. Cependant, l'imagerie serait également impliquée dans des activités de production. Par anticipation, les images générées peuvent être à l'origine de la création de formes statiques telles que des oeuvres artistiques ou dynamiques comme des chorégraphies ou des mouvements sportifs (Denis, 1985). D'ailleurs Piaget et al. (1966), distinguent les "images anticipatrices" des "images reproductrices". Les premières représentent des événements nouveaux que le sujet n'a pas encore perçu alors que les secondes permettent d'évoquer des faits, des scènes ou des événements déjà rencontrés au préalable. Cependant Smyth et al. (1998) rappellent que "du fait du contexte spatial et perceptif de l'action, l'imagerie de mouvement est complexe. On peut imaginer à quoi ressemble un mouvement depuis une perspective interne ou externe, on peut sentir un mouvement, entendre ses conséquences, rappeler sa structure, percevoir l'effort exercé ou planifier une séquence".

II -4.4.2.Quels modèles pour l'image motrice ?

D’un point de vue théorique, l’imagerie motrice est classiquement analysée selon deux conceptions différentes. Il convient de distinguer les "théories cognitives" et les "théories neuromusculaires".

Dans le premier cas, elle est considérée comme une activité à caractère hautement symbolique qui reflète la mise en œuvre d’un plan d’action élaboré au niveau central. Cependant, bien qu’il puisse exister une identité de structures neuronales (Deecke, 1996; Roland, Larsen, Lassen, & Skinhoj, 1980; Decety, 1996a pour une revue) et cognitives entre action motrice réelle et simulée, l’action simulée subirait des blocages ou des inhibitions en cascades de la commande motrice au niveau central (Berthoz, 1996) et au niveau spinal. Pour Jeannerod (1994), "les décharges efférentes générées pendant le processus d'imagination constituent le substrat de la facilitation motrice en préparant les voies motrices au passage de bouffées descendantes".

Ces théories considèrent que l'efficacité de la répétition mentale provient du traitement cognitif lié à cette activité. Dans ce contexte théorique, l'élaboration d'une représentation mentale de la situation environnementale, du mouvement à effectuer et des contraintes devient le problème central. Pour le sujet, l’intérêt de l’imagerie motrice serait d’améliorer l’organisation de la perception. Ce point de vue est en accord avec les théories cognitives de l'apprentissage moteur (Adams, 1971; Schmidt, 1975) pour lesquelles une activité cognitive intense caractérise les premiers stades de l'apprentissage. En effet, d'après ces modèles la répétition mentale est très efficace en début d'apprentissage alors que son efficacité est diminuée par la suite lorsque le sujet contrôle sa motricité sans recourir à un traitement essentiellement cognitif.

Dans le second cas, il s’agit de mettre en évidence la nature des relations qu’entretiennent l’action motrice réelle et l’action motrice simulée à partir du postulat de l’existence d’une forte continuité entre les deux. L’objectif est de mettre en relation les effets de la répétition mentale et l'activité neuromusculaire concomitante de cette répétition. Dans ce type de théories, l’action simulée inclurait des sorties motrices et des sensations kinesthésiques. Elle serait une reproduction à échelle réduite de l’action réelle (Annett, 1996). Cette argumentation est basée sur l’existence, lors du mouvement imaginé, de patrons musculaires de faible amplitude dans les groupes musculaires impliqués dans le mouvement réel. Depuis les études de Jacobson (1932), il est reconnu que la répétition mentale entraîne une activité électromyographique sur un muscle au repos habituellement sollicité dans la réalisation effective de la tâche considérée. Wehner et al. (1984) ont cherché à caractériser le

type de relations existant entre l'activité électromyographique générée au cours de la répétition mentale et la tâche elle-même. En condition de mouvement imaginé, ils ont mis en évidence une distribution spectrale du signal électromyographique du biceps brachial spécifique de la tâche de poursuite manuelle étudiée. L'interprétation de ces résultats reste délicate mais les auteurs semblent envisager que l'activité électrique enregistrée au niveau musculaire reste un effet de la répétition mentale. En fait, plusieurs études ont montré que le mouvement imaginé s'accompagne d'une activation motrice des muscles sollicités lors du mouvement réel voire même de petits mouvements. Cette activité électromyographique périphérique serait suffisante pour envoyer une information kinesthésique vers le système nerveux central. Cette information permettrait de générer une image kinesthésique du mouvement réel.

Annett (1996) propose une théorie mixte qui pourrait constituer une alternative empruntant aux deux conceptions "cognitive" et "neuromusculaire". Il considère que le "sens de l'effort" (James, 1892 cité par Annett) est nécessaire à toute activité d'imagerie. Cette notion fait référence aux changements perceptifs inhérents à l'activité motrice. De plus les sujets sont capables de relater des expériences semblables à celles attendues lors du mouvement réel. Des mécanismes de mémoire de rappel seraient à l'origine de ces capacités. Dès lors, l'auteur propose d'envisager l'imagerie motrice comme "l'activation d'un prototype de l'action" et comme "la mémorisation des conséquences perceptives des actions similaires réellement exécutées". Il postule que "le premier élément partage les caractéristiques du mouvement réel alors que le second se substitue aux feedback sensoriels qui proviennent normalement du mouvement réel". Ce modèle est en accord avec l'hypothèse de l'équivalence fonctionnelle en ce qui concerne l'activation du prototype de l'action. Par contre, il s'y oppose partiellement pour la mémorisation des conséquences perceptives des actions.

II -4.4.3.Images motrices et déplacements

Decety et al. (1989) et Decety (1991) ont étudié les tâches de navigation représentée. Dans une première expérience, Decety et al. (1989) ont mesuré les durées nécessaires pour parcourir soi-même un trajet imaginé. Pour cela, ils ont disposé trois cibles sur le sol respectivement distantes de 5, 10 et 15 mètres du point de départ des sujets. Après avoir été invités à former une représentation mentale des cibles, les sujets ont marché soit réellement soit mentalement vers elles. Les résultats indiquent d'une part qu'il faut d'autant plus de temps pour marcher vers les cibles qu'elles sont éloignées pour les deux conditions de marche et d'autre part qu'à distance égale il faut le même temps pour la marche imaginée que pour la

marche réelle. Utilisant ce protocole dans une seconde expérience, les mêmes auteurs ont demandé aux sujets d'imaginer qu'ils marchaient en portant un sac à dos de 25 kg. Ils ont bien sûr mesuré la durée de la marche mentale et de la marche réelle. Alors que la durée de la marche réelle ne subit aucune modification que le sujet soit chargé ou non, la durée de la marche mentale a tendance à augmenter d'environ 30 % avec la charge. A la lumière de ces résultats les auteurs suggèrent une continuité entre les mécanismes responsables de la performance mentale et ceux responsables de la performance physique. Selon eux les structures d'exécution du mouvement sont sous la hiérarchie de structures mentales qui sous-tendent toutes les actions planifiées. De ce fait, le contenu des structures mentales peut être identique que l'action motrice soit déclenchée et exécutée jusqu'à son terme ou qu'elle soit simplement évoquée mentalement. Le différence entre les deux conditions de charge est interprétée comme la preuve que les sujets ne codent pas la durée de l'exercice mais génèrent une plus grande force pour compenser l'augmentation imaginée de l'effort à produire.

Cette hypothèse est compatible avec une étude ultérieure visant à quantifier l'effet des contraintes et d'une expérience préalable de la tâche (Decety, 1991). Les sujets de cette expérience, répartis en deux groupes, ont eu à imaginer et marcher réellement sur des poutrelles dont l'étroitesse est assimilée à un degré de difficulté. En manipulant l'ordre de présentation des conditions de marche (imaginé-réel-imaginé *vs* réel-imaginé-imaginé) il a été montré que le temps mental du premier bloc d'essais augmente en fonction de l'index de difficulté pour le premier groupe alors qu'il est équivalent au temps de marche réelle dans tous les autres cas sans incidence de l'index de difficulté. On constate donc que la pratique motrice préalable de la tâche joue un rôle important. Elle est impliquée dans un processus cognitif de mise à jour de l'image mentale du mouvement fut-il un mouvement particulièrement bien maîtrisé comme la marche.

Cependant, cette participation des contraintes motrices ou dynamiques (Shepard, 1984; Hubbard, 1995a; Hubbard, 1995b; Schwartz, 1999) à l'élaboration des images semble régie par certaines lois. Elles semblent pouvoir s'appliquer à des mouvements segmentaires (Parsons, 1987) et des processus moteurs seraient également impliqués dans des tâches de rotation mentale (Wexler, Kosslyn, & Berthoz, 1998). Parsons (1994) a étudié le mouvement imaginé de la main permettant de passer d'une position donnée à une autre position. Il a été montré que le temps nécessaire est égal au temps réel pour des mouvements naturels c'est-à-dire les plus communs et les plus confortables pour le sujet. Par contre le temps imaginé diminue dès que le mouvement devient complexe entre deux postures de la main difficiles à produire naturellement. Pour ces mouvements moins familiers Parsons (1994) suggère que le

processus de simulation s'appuie sur une information biomécanique moins détaillée et que la tendance par défaut est de simuler de façon rapide et sommaire. On peut dès lors envisager que l'on simule les mouvements de son corps en formant une représentation précise des trajectoires dans l'espace et de leurs corrélats biomécaniques avec une dynamique temporelle comparable à celle du mouvement réel.

Wexler et al. (1998) ont confirmé la participation de processus d'origine motrice lors de tâches de rotation mentale similaires à celles proposées par Cooper et al. (1973). En créant une double tâche de rotation mentale concomitante d'une tâche de rotation motrice de même sens ou de sens opposé, ils ont montré que i) l'imagerie est plus rapide et possède moins d'erreurs lorsque les deux rotations (mentale et motrice) sont effectuées dans le même sens, ii) les angles de rotation mentale et motrice sont corrélés seulement si les sens de rotation sont compatibles, iii) la forme classique des réponses de rotation mentale est modifiée au profil des réponses motrices et que iv) ce phénomène est dépendant de la vitesse de rotation motrice.

Certaines contraintes motrices viennent également peser sur les déplacements imaginés du corps entier (Decety & Jeannerod, 1996). Les auteurs ont aménagé un espace virtuel composé de portes de largeurs différentes (15, 90 et 135 cm) et plus ou moins éloignées (3, 6 et 9 m) du sujet qui devait les franchir après avoir marché vers elles. Les résultats font apparaître une augmentation des temps de marche mentale avec l'augmentation de la distance alors que l'augmentation de la largeur des portes permet de les faire diminuer (Figure II-24 A). Ce type de relation, typique d'un échange vitesse / précision a déjà été formalisé par Fitts (1954) pour le pointage manuel alternatif. La loi de Fitts stipule que le temps de mouvement (*TM*) est une fonction linéaire de l'index de difficulté de la tâche (*Id*) et s'écrit sous la forme :

$MT = a + b\ Id$ avec $Id = \log_2 2D/W$

(où D représente la distance inter cibles et W est la largeur des cibles)

Bien que la loi de Fitts puisse être interprétée selon différentes approches (Bootsma, Mottet, & Zaal, 1998; Mottet & Bootsma, 1999), le fait qu'elle se vérifie également dans leur expérience (Figure II-24 B) incite Decety et al. (1996) à penser que les actions simulées mentalement sont régies par des règles motrices d'origine centrale.

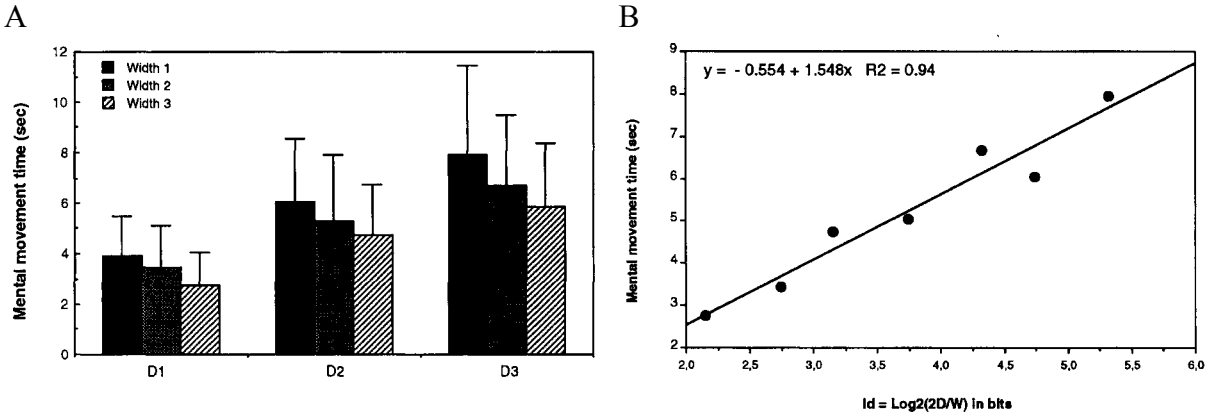


Figure II-24 : A) Temps de marche mentale pour les 9 conditions expérimentales (3 distances et 3 largeurs de portes), B) Temps de marche mentale en fonction de l'index de difficulté de la tâche (Decety et al., 1996).

Cette ligne de pensée est renforcée selon ce groupe d'auteurs par des résultats d'imagerie cérébrale (Decety et al., 1994) ou par les changements d'activité de certains organes périphériques lors de l'évocation de mouvements (Decety, Jeannerod, Germain, & Pastene, 1991; Decety, Jeannerod, Durozard, & Baverel, 1993; Wuyam et al., 1995; Yue & Cole, 1992). Cependant, le caractère complexe de l'imagerie motrice est souligné par Smyth et al. (1998) qui montrent dans le cas de déplacements complexes que la représentation de l'action peut prendre des formes variées. En effet, ces auteurs ont mis en évidence des interactions entre l'évocation de déplacements (horizontaux ou verticaux) en escalade sportive et des tâches additionnelles à dominante visuelle, spatiale ou kinesthésique. Ceci tendrait à indiquer la participation de différentes modalités sensorielles et différents processus cognitifs à l'activité d'imagerie motrice et serait tout à fait compatible avec la complexité des fonctions de la pratique mentale chez les sportifs (Jones & Stuth, 1997 pour une revue). Elle joue un rôle d'amélioration de la performance, de régulation tonique, de modification affective et cognitive et de réhabilitation.

En résumé, former et utiliser des images motrices sont des opérations cognitives qui impliquent une représentation du mouvement à réaliser. De ce fait, ces images peuvent posséder des propriétés proches de celles du mouvement réel. En particulier, c'est le cas lorsque le mouvement évoqué est simple, parfaitement intégré par le sujet (marche en ligne droite par exemple) et dépourvu de variations de contraintes externes d'origine biomécanique (terrain constamment plat, absence d'obstacles ou de changement de direction). Par contre, les propriétés des images motrices semblent plus éloignées de celles du mouvement réel dans le cas de mouvements complexes même si elles peuvent obéir à certaines lois.

III - Expérience 1 : Etude préliminaire des indices visuels nécessaires à la restitution d'une configuration spatiale mémorisée en escalade sportive.

III -1. Présentation de l'expérience

La locomotion considérée comme l'activité de déplacement du corps d'un point de l'espace à un autre est une activité fonctionnelle qui permet aux animaux d'assurer leur survie. Elle facilite l'atteinte de ressources alimentaires, la prédation ou le retour au gîte. En sport, la nécessité de se déplacer avec rapidité ou précision dans l'environnement est également prépondérante. Elle implique que le sujet connaisse les caractéristiques de cet environnement. Pour cela il utilise différentes méthodes basées sur la perception directe de stimuli environnementaux et / ou sur une représentation interne, mémorisée, de la situation. En fait la question qui est posée ici est celle de la nature des indices visuels nécessaires à la restitution des caractéristiques (essentiellement spatiales) d'une situation sportive préalablement mémorisée. Par exemple, en escalade le type d'informations visuo-spatiales utilisées par le grimpeur pour restituer les caractéristiques morphologiques de l'environnement est encore mal connu (Dupuy & Ripoll, 1989; Dupuy, Ripoll, & Flahaut, 1992). Dans ce contexte, notre objectif sera de déterminer la nature des informations visuelles mémorisées pour restituer les propriétés spatiales de l'environnement dans lequel le mouvement du grimpeur est produit. La question qui se pose est celle de savoir quelles sont les informations visuelles nécessaires pour créer une image mentale conforme aux propriétés géométriques du mur, c'est à dire possédant le moins de déformations et de fluctuations possibles par rapport aux caractéristiques de la situation réelle (page 54).

III -1.1.Mémorisation et déplacement du corps.

La mémoire est une entité complexe. Elle peut être déclarative, implicite, de travail, épisodique, procédurale, à court terme, à long terme, iconique, topographique, spatiale, sémantique, lexicale, motrice. Nous venons de voir que la perception est prédictive en ce qu'elle permet de construire des images mentales qui permettent d'anticiper le résultat d'une action. "Mais la perception est prédictive aussi, et peut être surtout, grâce à la mémoire. Car la mémoire sert d'abord à prédire les conséquences de l'action future en évoquant celles de l'action passée." (Berthoz, 1997). Giraudo et al. (1999) définissent la mémoire comme "la préservation dans le temps de représentations internes (images mentales) qui réapparaissent en

l'absence de l'objet correspondant et qui sont basées sur des processus aux caractéristiques semblables à celles de la perception".

III -1.1.1.Les boucles et la mémoire de rappel.

Treves et al. (1991) ont découvert dans le réseau hippocampique l'existence de boucles neuronales impliquées dans la mémorisation. Il semblerait que l'information passe deux fois dans ces boucles ce qui permettrait une mémoire de type " mémoire de rappel ". Or celle-ci est utile pour retrouver un épisode ou une combinaison de sensations avec seulement une partie de l'information et pour prédire les conséquences des actes futurs.

Johansson (1973) a montré que nous sommes capables de reconnaître un homme dansant avec seulement 5 ou 6 points dessinés. Cette capacité peut être appréhendée comme une fonction de " remplissage " autour des fragments en mémoire. La théorie de Shepard (1984) s'inscrit dans ce cadre puisqu'il montre qu'il existe une résonance entre un répertoire de représentations internes (pré-perceptions) et des indices, même incomplets, issus de l'environnement. Il évoque d'ailleurs un parallèle entre cette idée et les harmoniques en musique. En effet, celles-ci sont des notes qui " sonnent double ". La note jouée fait entrer en résonance la même note située un octave plus bas.

III -1.1.2.La mémoire des lieux

Si l'on demande à quelqu'un d'imaginer le trajet qu'il effectue pour se rendre au travail, deux options s'offrent à lui. Il peut, d'une part, tenter d'avoir une vision globale du chemin qu'il a à parcourir. Cela revient pour lui à imaginer qu'il survole la ville et donc qu'il utilise une carte cognitive que Gallistel (1990) définit comme " un enregistrement au niveau du système nerveux central des relations géométriques macroscopiques entre les surfaces de l'environnement utilisées pour planifier le déplacement ". La capacité d'utiliser des raccourcis ou de faire des détours pour se rendre d'un point de l'espace à un autre serait fortement lié à une représentation de l'espace sous la forme de carte cognitive. La deuxième façon de procéder est d'aller de points connus en points connus pour finir par couvrir une grande distance à partir d'une succession de vues locales. Par contre, si un point caractéristique disparaît ou est déplacé, le sujet ne sait plus atteindre le point d'arrivée. Ce type de courant de pensée propose le paradigme qu'une carte mentale est structurée par rapport aux propriétés spatiales réelles (Kosslyn et al., 1978; McNamara, 1986). Ces auteurs ont montré qu'une carte est mentalement divisée en grandes régions. Chaque région est alors représentée comme une " branche " différente dans une arborescence qui définit les relations de régions à régions.

D'autres auteurs au contraire ont attribué l'organisation des cartes à des propriétés qui ne sont pas de l'ordre du spatial mais du temporel. Clayton et al. (1991) ont en effet montré que la proximité temporelle entre deux présentations de lieux affecte la probabilité que ces deux lieux soient associés sur une carte mentale. Le temps de réponse est en effet plus court avec des stimuli rapprochés qu'avec des stimuli éloignés dans le temps. D'autres enfin y ont vu une combinaison d'informations spatiales et temporelles. McNamara et al. (1992) ont joué sur la combinaison d'informations temporelles et spatiales proches ou lointaines pour montrer que la mémorisation est meilleure lorsque les informations sont proches dans le temps et proches dans l'espace. Et ce probablement parce que la proximité temporelle augmente la probabilité que les deux points soient dans la mémoire de travail en même temps et donc associés d'un point de vue spatial. Ces connaissances ont été complétées en montrant que l'organisation des cartes mentales utilise différents types d'informations durant l'apprentissage (Curiel & Radvansky, 1998). En effet, il ont remarqué que nommer des objets résulte d'une organisation temporelle alors que les pointer résulte d'une organisation spatiale.

III -1.1.3.Déformations et fluctuations mnésiques.

Nous avons vu que la réalité est déformée au sein des images mentales par des contraintes environnementales. Mais nous venons aussi d'étudier le rôle de la mémoire dans ces processus : nous " utilisons des informations stockées dans la mémoire à long terme pour créer une représentation mémorisée à court terme " (Kosslyn et al., 1978). Ainsi, ceci nous amène intuitivement à penser qu'à la suite de ces opérations mentales, la réalité est à nouveau déformée. Voyons de quel ordre sont ces déformations.

Giraudo et al. (1994) ont montré le rôle du type d'apprentissage sur ces déformations. Ils ont fait la différence entre fluctuation qui relève d'une distribution centrée autour du point réel et distorsion qui indique une distribution autour d'un point virtuel différent du point réel. Lorsqu'il y a apprentissage sur une carte d'une ville virtuelle, ils n'observèrent que des fluctuations dans les réponses données alors qu'après un apprentissage par navigation ils remarquèrent des fluctuations et des distorsions. Un paradoxe surgit donc ici par rapport à l'équivalence fonctionnelle entre réalité et image mentale. En effet, il s'avère qu'il semble exister des déformations fonctionnelles en relation avec les contraintes du mouvement. Plus qu'images visuelles, il apparaîtrait donc plus judicieux de parler d'images opératives.

III -1.2.Mémorisation, geste sportif et environnement

Ce type de paradigme a été mis en œuvre en sport (Cordier & Giraudo, 1993). Ces auteurs ont montré que le vécu antérieur avait une grande influence sur la distorsion mnésique chez les guides de haute montagne. Ils ont montré que les guides très expérimentés ont un plus fort taux de distorsion que les jeunes guides. Il semblerait qu'ils prennent en compte des facteurs environnementaux liés à leur activité (rimayes difficiles à franchir et où l'on avance moins vite, zones dangereuses où il faut avancer plus vite…), ce qui indiquerait qu'ils ont une carte mentale topographique où les distances sont codées en fonction du temps nécessaire pour aller d'un point à un autre.

L'escalade présente un modèle de mouvement particulièrement intéressant pour étudier les déformations mnésiques. Dupuy (1991) propose de définir cette activité comme un déplacement "sur un terrain raide et varié, un terrain dont la pente interdit la station bipédique fondamentale de l'espèce, un terrain inconnu qui oblige à faire face à l'incertitude du plus loin, à s'engager physiquement et psychologiquement pour réussir le passage". L'escalade est une activité physique de pleine nature et fait donc appel à des habiletés dites ouvertes où le sujet est en constante interaction avec un environnement qui évolue sans cesse.

Pour étudier l'escalade rocheuse et les contraintes qui pèsent sur un grimpeur, Cordier et al. (1994) se sont inscrit dans le cadre des théories dynamiques de l'apprentissage. En effet, pour ces auteurs, tout apprentissage tend vers une diminution des coûts ; c'est ce que l'on nomme la recherche de l'efficience. Or ils ont montré que cette efficience est matérialisée en escalade par une trajectoire qui est souvent décrite comme "fluide". Ainsi, si l'on compare la trajectoire d'un expert à celle d'un débutant, la première sera plus lissée que la seconde. Ils ont quantifié cette " fluidité " au moyen d'un indicateur, l'entropie de la trajectoire qui est égale à log2L / c où L représente la longueur de la trajectoire et c la longueur de l'enveloppe convexe de celle-ci. . C'est un index global qui permet d'assimiler la trajectoire du grimpeur à une signature de son comportement moteur. Quand l'entropie augmente, la trajectoire s'éloigne de la "trajectoire fluide idéale". Ils ont montré que l'entropie diminue au fil des essais et qu'elle est plus faible chez les experts que chez les non-experts. De plus, ils ont remarqué qu'elle se stabilisait plus vite chez les experts que chez les non – experts. Donc l'entropie en tant qu'indice de mesure de la signature motrice du grimpeur est bien un index représentatif du niveau d'expertise mais c'est aussi une mesure du niveau de contraintes de la voie si on l'applique à la trajectoire d'un expert. De plus, Cordier et al. (1996) ont montré que le couplage sensori-moteur est organisé de manière optimale quand le comportement dynamique du système est organisé autour du nombre minimal de composants harmoniques.

Ces harmoniques montrent l'émergence d'états stables autour d'attracteurs quasi périodiques. Ils observent que les experts tendent plus vite vers ces états stables. De plus, après filtrage du signal pour enlever les basses fréquences révélatrices de l'adaptation du sujet aux contraintes environnementales, ils obtiennent ce qu'ils nomment la composante intrinsèque du comportement moteur. Cette composante est en fait la fonction qui lie la vitesse horizontale du centre de gravité du sujet à sa position. Cette fonction est de type circulaire autour d'un attracteur cyclique chez les experts alors qu'elle est d'allure chaotique chez les non–experts. Une tâche complexe n'est donc pas une somme de tâches discrètes mais l'émergence d'une harmonie dynamique en réponse à une contrainte environnementale. Ainsi, là aussi, ces attracteurs permettent de penser que le grimpeur est soumis à des lois de mouvement strictes qui influencent inconsciemment sa réponse.

Dès lors se pose la question de la place de la mémorisation dans l'apprentissage d'une situation d'escalade. Dans le cadre de l'escalade compétitive, deux phases distinctes très importantes sont institutionnalisées par les règlements sportifs : la lecture et l'isolement. Elles précèdent la phase d'escalade proprement dite. La " lecture de l'environnement " correspond à un temps de détermination des caractéristiques du milieu dans lequel le sujet va devoir interagir. En effet, pour minimiser les coûts, il devra adapter sa motricité aux contraintes de cet environnement. Il devra donc repérer la position des prises, l'emplacement des points de moindre effort mais aussi la motricité envisagée pour chaque passage… Ensuite, le règlement de l'escalade de compétition impose un temps d'isolement où le grimpeur est mis à l'écart de tout contact extérieur. Pendant ce temps plus ou moins long, il doit mémoriser la configuration de la voie. Il doit construire une image mentale visuelle et motrice qu'il devra mémoriser pour la restituer lors de son passage dans la voie

III -2. Objectif de l'expérience

Comme on l'a vu précédemment, il semble exister un certain paradoxe. En effet, le mouvement peut être appréhendé comme la résultante émergeant d'une interaction entre le grimpeur et les propriétés physiques de son environnement. Mais il pourrait également être la manifestation d'une interaction entre le système moteur et le système cognitif.

Dans ce contexte, notre objectif sera de déterminer la nature des informations visuelles mémorisées pour restituer les propriétés spatiales de l'environnement dans lequel le mouvement sportif est produit. La question qui se pose est celle de savoir quelles sont les informations visuelles nécessaires pour créer une image mentale conforme aux propriétés géométriques du mur, c'est à dire possédant le moins de déformations et de fluctuations possibles par rapport aux caractéristiques de la situation réelle.

Nous faisons les hypothèses suivantes :

1) La restitution mémorisée est spatialement plus proche de la situation d'origine quand le stimulus encodé comporte un trajet.

2) Par contre, de meilleures performances de restitution sont obtenues quand ce trajet est dynamique c'est à dire qu'un mouvement est introduit dans le stimulus à mémoriser

3) Enfin, des sujets experts d'escalade sont plus performants que des sujets non experts de ce sport lors de la restitution.

III -3. Sujets :

Huit sujets de sexe masculin (Tableau 1), pratiquants l'escalade, ont participé à cette expérience . Quatre d'entre eux sont considérés comme experts (niveau à-vue ≥ 6c) et appartiennent au groupe " National " de notre protocole. Les quatre autres sujets sont considérés comme débutants (niveau à-vue ≤ 6a) et appartiennent au groupe "Départemental ". Leur participation est volontaire et ils ne sont pas rémunérés.

Sujet	Niveau	Niveau actuel A-vue	Age	Age	Taille	Poids	Date du test	Ordre	Essais calib
			Années	Mois					
S2	Départemental	6a	24	11	184	72	17/04/02	3/2/1/4/5	8
S5	Départemental	5c	23	4	173	65	28/04/02	2/3/1/5/4	9
S8	Départemental	6a	25	8	169	59	15/04/02	2/3/1/4/5	8
S4	Départemental	5b	25	8	178	70	03/05/02	3/2/1/5/4	9
S1	National	7a+	28	2	185	72	16/04/02	3/2/1/5/4	8
S6	National	6c	25	0	182	73	02/04/02	2/3/1/4/5	8
S7	National	7a+	25	1	180	70	01/05/02	3//2/1/4/5	10
S3	National	7a	29	5	190	69	22/05/02	2/3/1/5/4	8

Tableau 1 : Caractéristiques des sujets de l'expérience (Nous avons retenu les résultats de 4 sujets du groupe «Départemental » et de 3 sujets du groupe « National » pour nos analyses quantitatives)

III -4. Procédure :

L'expérimentation proprement dite est précédée d'une phase de calibration. Ces deux parties consistent à présenter aux sujets des stimuli visuels sur écran d'ordinateur et à receuillir leurs réponses données avec la souris. Pour cela, deux programmes informatiques ont été développés en 3DVL (© G. Dietrich) et Matlab(© The Mathworks). L'ensemble du protocole est administré sur un ordinateur portable PIII, 500Hz, écran TFT 14' ayant 64 Mo.

La phase de calibration a pour objectif de vérifier la capacité des sujets à utiliser une souris pour pointer avec précision sur l'écran.

III -4.1.Présentation des stimuli.

III -4.1.1.Phase de calibration :

Un chiffre et un point sur fond noir sont présentés brièvement au sujet. Il doit ensuite restituer oralement le chiffre et cliquer à l'endroit où le point était apparu.

Le test se poursuit tant que le sujet n'a pas réalisé huit réponses jugées correctes. Une réponse est acceptée lorsque la distance entre le point cliqué par le sujet et le point présenté par l'expérimentateur n'excède pas 5% de la diagonale de l'écran noir.

III -4.1.2.Phase d'expérimentation :

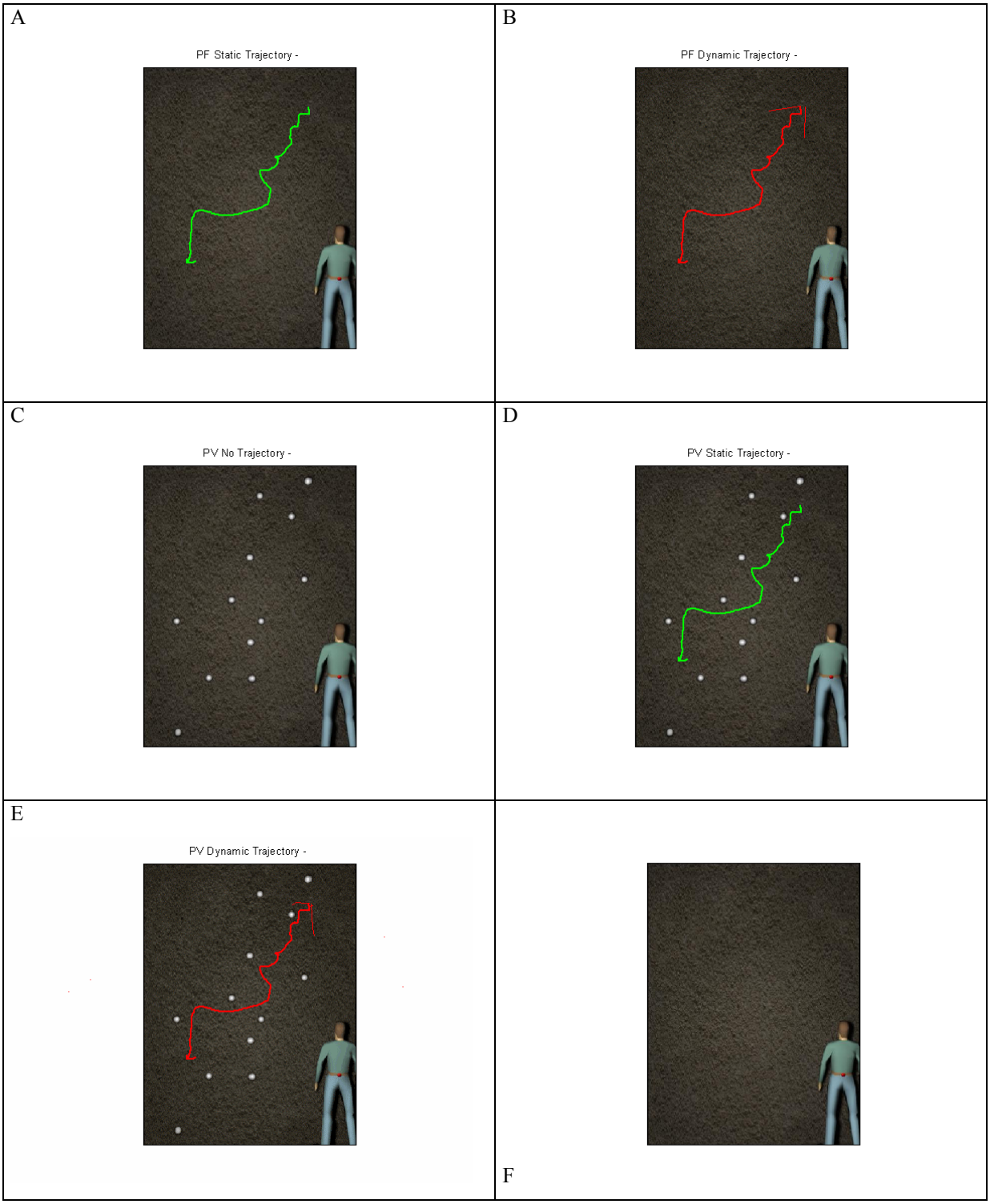


Figure III-1 : Images des cinq conditions expérimentales telles qu'elles apparaissent aux yeux du sujet (A : PFSTATR, B : PFDYNTR, C : PVNO_TR, D : PVSTATR, E : PVDYNTR. Le mur vide (F) représente l'écran de réponse.

(Les données utilisées sont issues d'une expérimentation (Vieilledent et al., 1996) au cours de laquelle un grimpeur devait réaliser une voie sur un mur d'escalade de 4m sur 3m.

Les douze prises retenues ici sont les prises qui ont été effectivement présentées au grimpeur. La trajectoire du grimpeur a été numérisée à 25 hz et reconstruite en 3D).

En cinq sessions de six essais, nous présentons au sujet l'image d'une situation d'escalade. Pour toutes les sessions l'image présentée comporte toujours un mur d'escalade et un grimpeur de dos. (Figure III-1 A à E).

Par contre, pour chaque session, différents éléments additionnels sont ajoutés à l'image. Trois types d'élément peuvent être ajoutés seuls ou en combinaison avec d'autres :

- Les prises (en blanc).
- Le trajet "statique" du bassin du grimpeur (en vert), c'est à dire de l'ensemble des positions de son bassin affichées simultanément. Une telle présentation ne comporte aucun point en mouvement.
- Le trajet "dynamique" du bassin du grimpeur (en rouge), c'est à dire de la suite des positions de son bassin affichées de façon unitaire à un instant t. Le sujet perçoit un seul point en mouvement mais pas sa trajectoire.

Ces combinaisons nous conduisent à proposer 5 conditions expérimentales (Figure III-1 A-E) :

- ***Trajet statique seul*** *(PFSTAT) : PF = Prises Fausses + STATR = Trajectoire Statique*
- ***Trajet dynamique seul*** *(PFDYNTR) : Prises Fausses Trajectoire Dynamique*
- ***Prises seules*** *(PVNO_TR) : Prises Vraies sans Trajectoire*
- ***Trajet statique et prises*** *(PVSTATR) : Prises Vraies avec Trajectoire Statique*
- ***Trajet dynamique et prises*** *(PVDYNTR) : Prises Vraies avec Trajectoire Dynamique*

L'ordre de passation des conditions change pour tous les sujets tout en cherchant à conserver trois impératifs. PFSTATR et PFDYNTR sont systématiquement proposées au début puisque les prises ne sont pas représentées. Ces 2 conditions sont présentées dans un ordre aléatoire aux sujets. La condition PVNO_TR est proposée ensuite. PFSTATR et PFDYNTR sont proposés à la fin puisqu'il s'agit des conditions comprenant des informations sur les prises et sur le trajet (statique ou dynamique). Ces 2 conditions sont également présentées dans un ordre aléatoire. A chaque essai, le sujet doit observer l'écran qui lui est présenté pendant 32 secondes (Figure III-1 A-E). Ce temps correspond au temps nécessaire à un grimpeur pour réaliser réellement cette voie. En d'autres termes, ce temps de 32 secondes est égal au temps du cas E (trajet dynamique).

III -4.2.Mode de réponse des sujets.

Pour chaque essai, la tâche du sujet consiste à cliquer avec la souris sur la position des prises imaginées (conditions PFSTATR et PFDYNTR) ou mémorisées car réellement perçues lors de la présentation du stimulus (conditions PVNO_TR, PVSTATR et PVDYNTR). Ces prises, au nombre de 12 sont restituées sur une image du mur vide. Cette image constitue la version la plus épurée de la situation d'escalade puisque le sujet ne bénéficie d'aucune information sur la position d'éventuelles prises ou sur une éventuelle trajectoire du grimpeur (Figure III-1 F). Le sujet dispose d'un temps illimité pour cliquer. La réponse qu'il produit est enregistrée et l'essai suivant commence lorsqu'il a indiqué l'emplacement des douze prises.

III -5. Variables dépendantes spécifiques à l'expérience

Pour quantifier la réponse des sujets à chaque essai, différentes variables dépendantes relatives aux données temporelles et spatiales sont calculées. Les données temporelles sont la durée de réponse et le temps d'initiation de celle ci. Les données spatiales sont la position relative des barycentres des prises stimuli et des prises réponses (éloignement et orientation relatifs), l'enveloppe convexe de la réponse (périmètre et aire) et la distance inter-prises.

III -6. Traitements statistiques

Les variables linéaires ont fait l'objet d'analyses de variance (Anova) à mesures répétées (2 Expertise * 5 Conditions * 6 Essais) et les comparaisons de moyennes ont été réalisées avec des tests *a posteriori* de Newman-Keuls et des comparaisons planifiées.

Les données circulaires ont fait l'objet de traitement spécifiques décrits ci-dessus (page 100).

III -7. Résultats

III -7.1.Résultats de sujets typiques

III -7.1.1.Sujet de niveau départemental

Les résultats obtenus dans les différentes conditions pour un débutant sont présentés ici. Les carrés correspondent aux “ prises cliquées ” par les sujets lors de leurs six essais par condition. Dans les trois dernières conditions, les ronds représentent les “ prises réelles ”. La trajectoire apparaît dans les conditions où elle est effectivement apparue aux sujets.

III -7.2. Condition Trajet Statique Seul

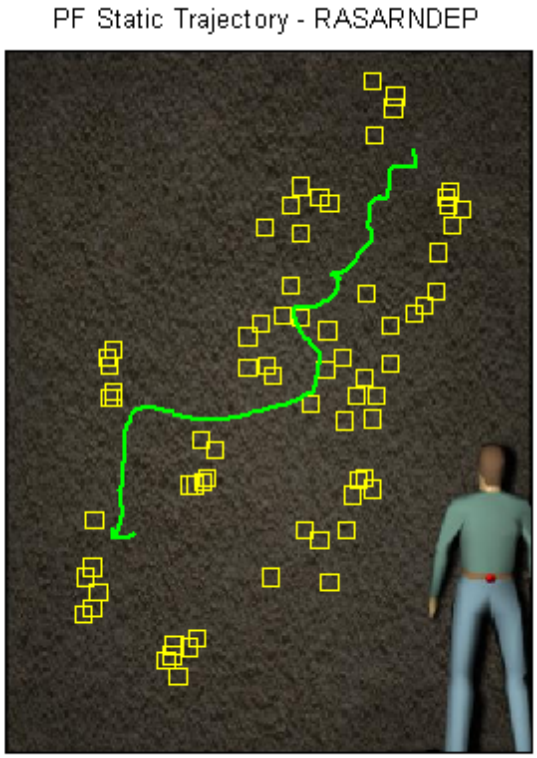


Figure III-2 : Résultats obtenus par un sujet débutant lors des 6 essais en condition "Trajet Statique Seul" (PFSTATR).

III -7.3.Condition Trajet Dynamique Seul

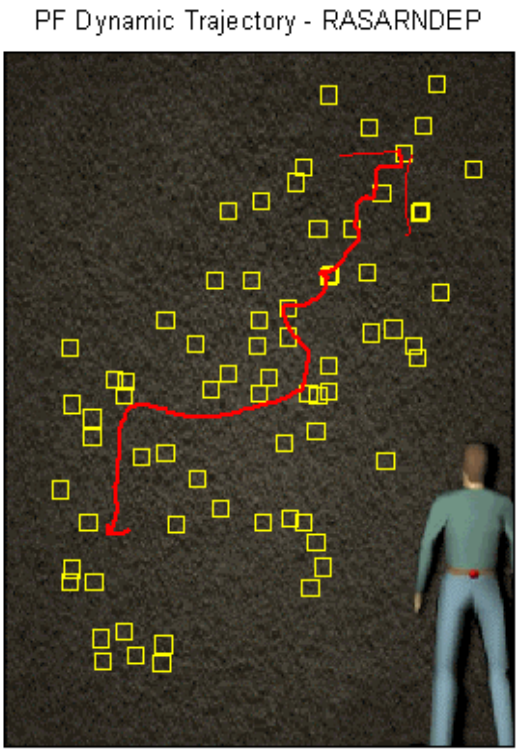


Figure III-3 : Résultats obtenus par un sujet débutant lors des 6 essais en condition "Trajet Dynamique Seul" (PFDYNTR).

III -7.4.Condition Prises Seules

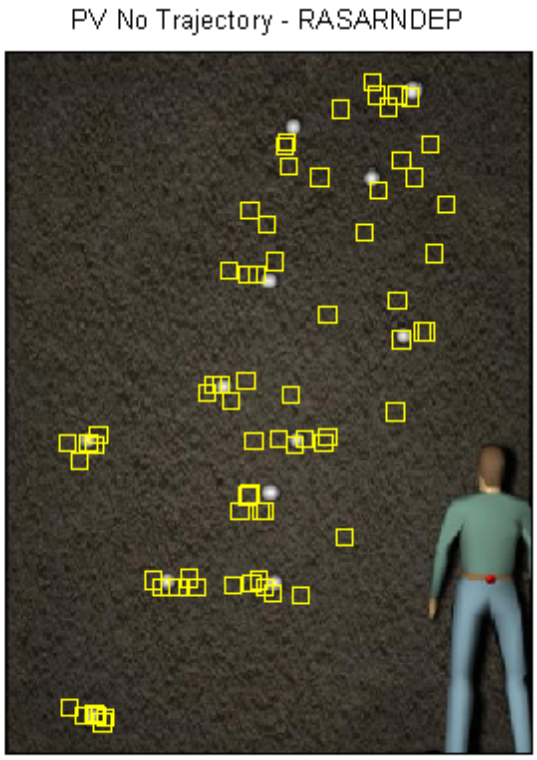


Figure III-4 : Résultats obtenus par un sujet débutant lors des 6 essais en condition "Prises Seules" (PVNO_TR).

III -7.5.Condition Trajet Statique et Prises

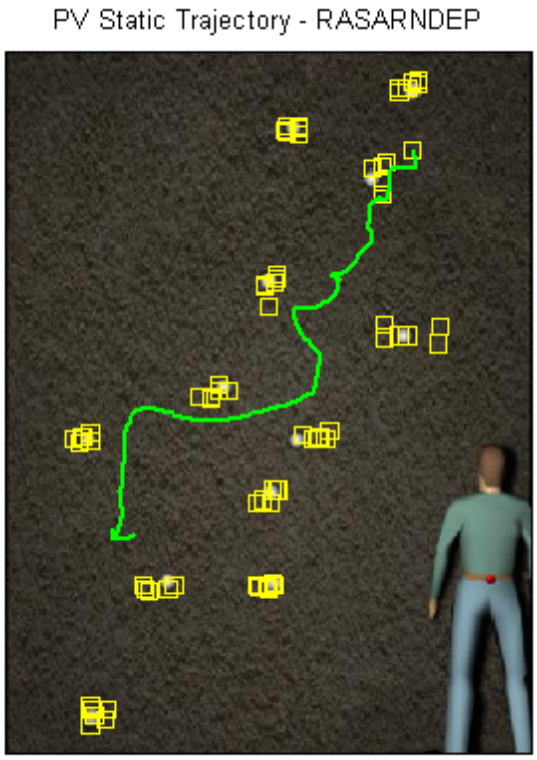


Figure III-5 : Résultats obtenus par un sujet débutant lors des 6 essais en condition "Trajet Statique et Prises" (PVSTATR).

III -7.6.Condition Trajet Dynamique et Prises

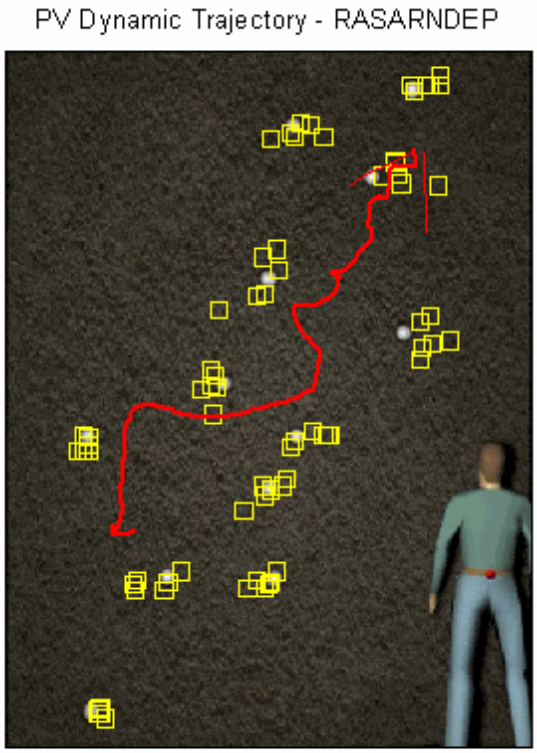


Figure III-6 : Résultats obtenus par un sujet débutant lors des 6 essais en condition "Trajet Dynamique et Prises" (PVDYNTR).

III -7.6.1.Sujet de niveau national

Les résultats obtenus dans les différentes conditions pour un sujet de niveau national sont présentés ici. Les carrés correspondent aux “ prises cliquées ” par les sujets lors de leurs six essais par condition. Dans les trois dernières conditions, les ronds représentent les “ prises réelles ”. La trajectoire apparaît dans les conditions où elle est effectivement apparue aux sujets.

III -7.7. Condition Trajet Statique Seul

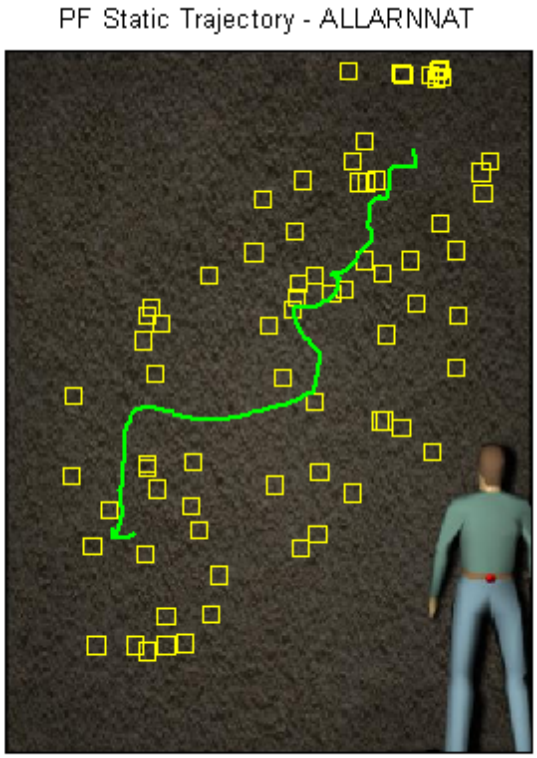


Figure III-7 : Résultats obtenus par un sujet national lors des 6 essais en condition "Trajet Statique Seul" (PFSTATR).

III -7.8.Condition Trajet Dynamique Seul

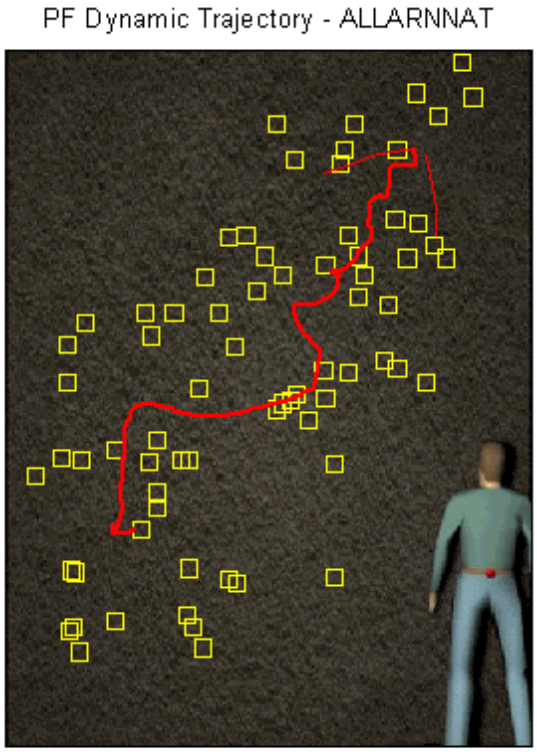


Figure III-8 : Résultats obtenus par un sujet national lors des 6 essais en condition "Trajet Dynamique Seul" (PFDYNTR).

III -7.9.Condition Prises Seules

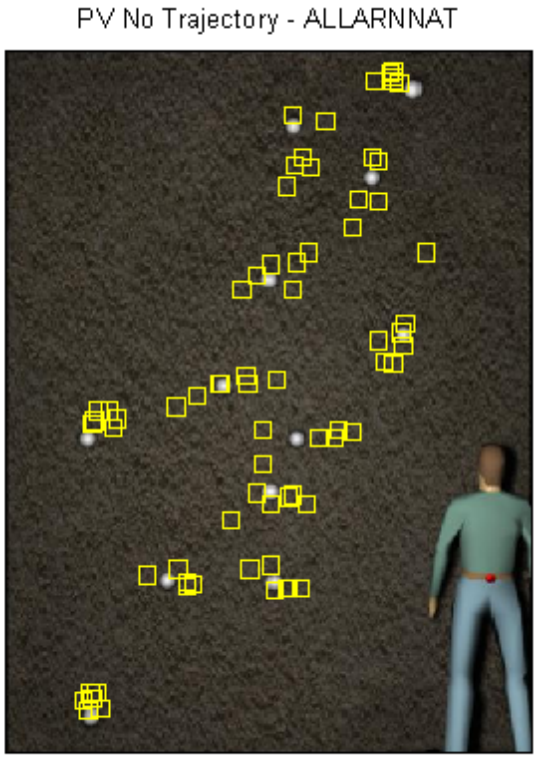


Figure III-9 : Résultats obtenus par un sujet national lors des 6 essais en condition "Prises Seules" (PVNO_TR).

III -7.10.Condition Trajet Statique et Prises

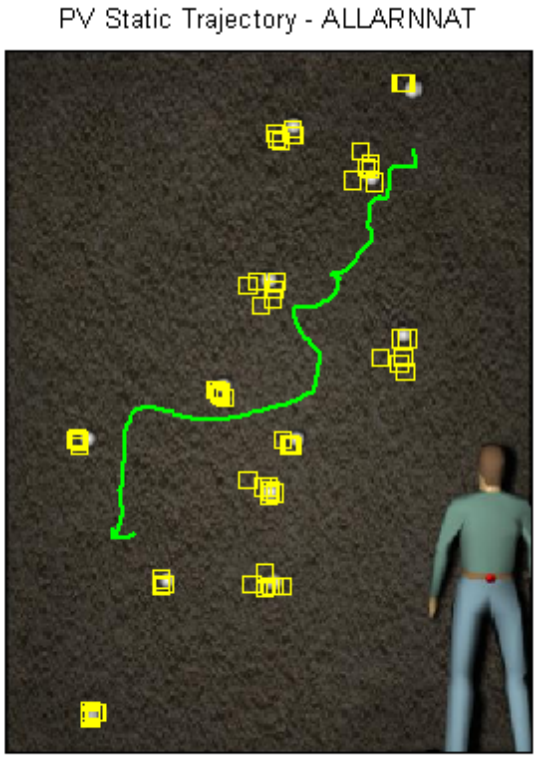


Figure III-10 : Résultats obtenus par un sujet national lors des 6 essais en condition "Trajet Statique et Prises" (PVSTATR).

III -7.11.Condition Trajet Dynamique et Prises

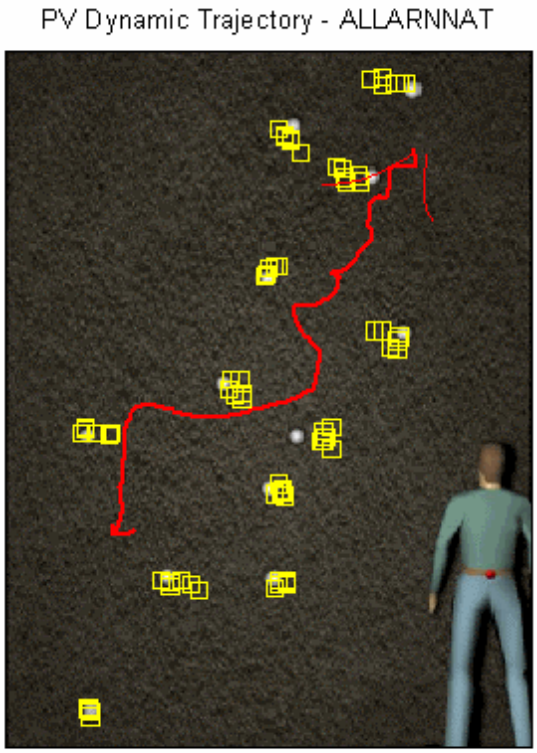


Figure III-11 : Résultats obtenus par un sujet national lors des 6 essais en condition "Trajet Dynamique et Prises" (PVDYNTR).

L'analyse visuelle des résultats bruts obtenus par nos sujets typiques ne laisse pas apparaître de différence pour une condition expérimentale donnée. Par contre, les positions des prises cliquées sont différentes selon les conditions expérimentales. En particulier, deux phénomènes distincts sont décelés ici. En premier lieu, les conditions PF se caractérisent par une grande dispersion des prises alors que les conditions PV se caractérisent par une dispersion réduite. Ensuite, les prises se répartissent sur l'ensemble du mur pour PF alors qu'elles sont concentrées autour des prises réelles pour PV.

III -7.12.Variables temporelles de la réponse des sujets

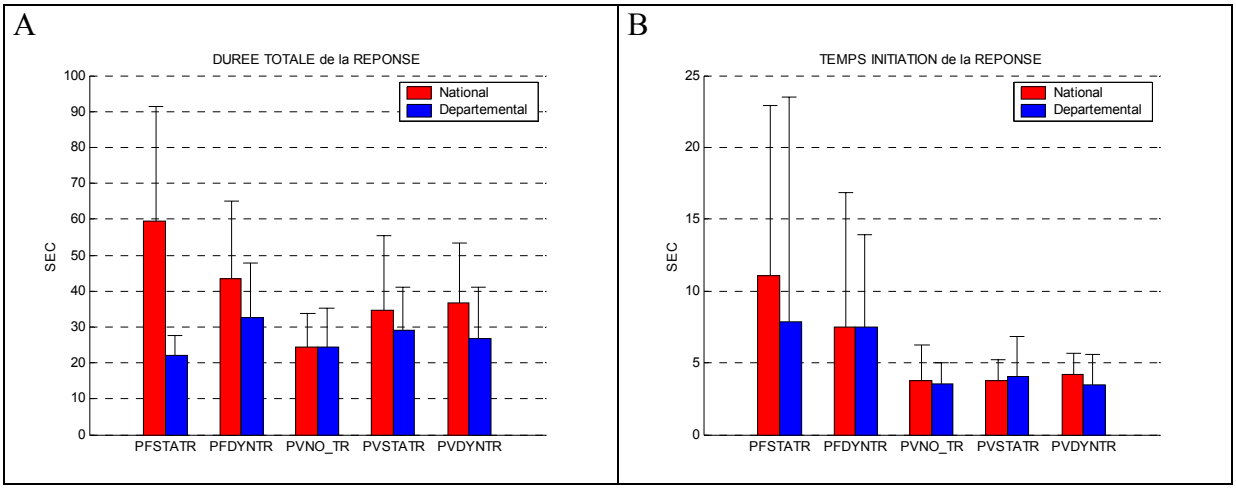


Figure III-12 : Durée totale de la réponse (A) et temps moyen d'initiation de la réponse (B) suivant les conditions expérimentales et le niveau d'expertise.

III -7.12.1.Durée moyenne

La durée totale moyenne des réponses est de 39.97 ± 23.9 secondes chez les experts et de 27.0.96 ± 12.4 secondes chez les débutants sans que l'on note d'effet significatif du niveau d'expertise ($F(1, 5)= 1.83$, $p>.05$). De plus, on ne note pas de différence due aux seules conditions expérimentales ($F(4,20) = 2.41$, $p>.05$). Par contre, une interaction existe entre condition et niveau ($F(4, 20) = 3.11$, $p<.05$) (Figure III-12 A). Ainsi, une différence significative est observée entre PFSTATR pour les experts et toutes les conditions des débutants ($p<.05$). Ensuite, les experts ont des résultats différents ($p<.05$) entre les deux premières conditions (PFSTATR et PFDYNTR) les trois dernières (PVNO_TR, PVSTATTR et PVDYNTR). En d'autres termes, deux résultats ressortent de cette analyse. D'une part, les experts mettent beaucoup plus de temps que les débutants pour placer les douze prises quelques soient les conditions. D'autre part, ils mettent plus de temps dans les conditions sans les prises que dans celles avec les prises. Les débutants quant à eux réagissent plus ou moins de la même manière quel que soit le stimulus.

III -7.12.2.Temps d'initiation de la réponse

Le temps d'initiation moyen de la réponse est de 6.1 ± 7.3 secondes chez les experts et de 5.3 ± 7.9 secondes chez les débutants. Le niveau d'expertise n'est pas une variable significative concernant ce temps ($F(1,5) = 0.39$, $p>.05$). Par contre, un effet des conditions expérimentales est observé ($F(4,20) = 2.99$, $p<.05$). La comparaison post-hoc des moyennes indique une différence ($p<.05$) entre les conditions PFSTATR et PVSTATR ce qui signifie

que le temps d'initiation de la réponse est plus élevé en absence de prises avec un trajet statique. Toutefois, un tel résultat n'est pas confirmé pour un trajet dynamique lors de la comparaison des conditions PVDYNTR et PVDYNTR (Figure III-12 B)

III -7.13.Variables spatiales globales.

III -7.13.1.Position relative des barycentres (stimulus / réponse).

III -7.13.1.1.Eloignement relatif.

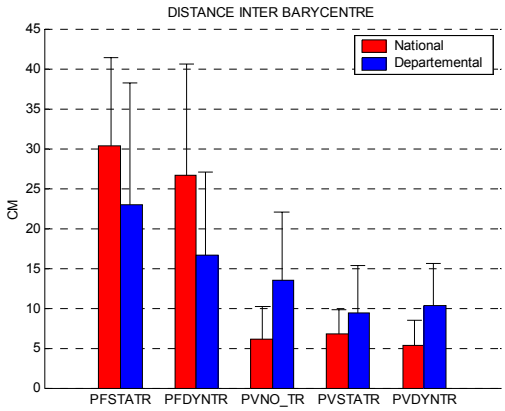


Figure III-13 : Distance entre le barycentre des prises stimulus et le barycentre des prises réponse en fonction des conditions expérimentales et du niveau d'expertise.

L'éloignement entre le barycentre des prises stimulus et celui des prises réponse est de 15.0 ± 13.8 cm chez les experts et de 14.6 ± 10.8 cm chez les débutants. Il n'y a pas de différence significative entre les experts et les débutants concernant cet éloignement relatif ($F(1,5) = 0.02$, $p>.05$). Par contre, cette différence de distance est fortement dépendante de la condition expérimentale ($F(4,20) = 17.34$, $p<.001$). Ainsi, les conditions PFSTATR et PFDYNTR (sans les prises) sont significativement différentes des conditions PVNO_TR, PVSTATR et PVDYNTR (avec les prises) ($p<.001$). Le fait de voir les prises contribue à l'obtention de meilleurs résultats chez les deux populations.

On observe une interaction (Figure III-13) entre le facteur niveau d'expertise et le facteur condition ($F(4,20) =3.36$; $p<.05$). L'analyse post hoc des moyennes montre que les débutants présentent une différence significative entre la condition PFSTATR et les conditions PVSTATR et PVDYNTR ($p<.05$). Les experts quant à eux ont une différence encore plus fortement significative entre les conditions PFSTATR et PFDYNTR (sans les prises) et les conditions PVNO_TR, PVSTATR et PVDYNTR (avec les prises) ($p<.001$). Il semblerait que les experts réagissent plus différemment face aux deux blocs de conditions que les débutants.

III -7.13.1.2.Orientation relative.

L'orientation moyenne du barycentre de la réponse par rapport à celui du stimulus est de 122° +/- 107° chez les experts et de 273° +/- 115° chez les débutants sans que l'on puisse certifier la significativité de cette différence compte tenu de la forte dispersion des données autour de la moyenne (Figure III-14 B). Cependant il existe un effet des conditions expérimentales. Il se traduit par une différence significative ($F(1,82) = 85.38$, $p < .001$) entre les conditions expérimentales PFSTATR (39.68° ± 11.21°) et PVSTATR (216.20° ± 14.46°). Par ailleurs, l'effet de la présence des prises se manifeste ($F(1,208) = 85,70$ $p < .001$) lorsqu'on compare les conditions sans prises (PF : PFSTAT et PFDYN) aux conditions avec prises (PV : PVNO_TR, PVSTATR et PVDYNTR) En effet, l'orientation relative moyenne pour les conditions sans prises est de 58° ± 12° alors qu'elle est de 230° ± 12° pour les conditions avec prise (Figure III-14 C). Ces valeurs sont très proches de celle de l'orientation de la trajectoire réelle. En effet, celle-ci est de 52° en montant et de 52° + 180 = 232° en descendant. Les sujets semblent donc avoir suivi la trajectoire pour placer les prises. Mais ils ont tendance à suivre cette trajectoire vers le haut pour placer les prises à la suite d'un stimulus comprenant les prises (PV) alors qu'ils l'auraient suivie vers le bas à la suite d'un stimulus sans celles-ci (PF). Enfin, si nous étudions l'interaction bloc de conditions (Prises présentes PV ou absentes PF) vs niveau d'expertise, il apparaît des différences d'orientation. La différence d'orientation relative est significative chez les experts ($F(1,88) = 63,44$, $p < .001$) entre les blocs de conditions PV et PF (Figure III-14 - D). De plus, elle est significative ($F(1,82) = 5,89$, $p < .001$) entre les débutants et les experts pour le bloc de conditions PF (Figure III-14-D).

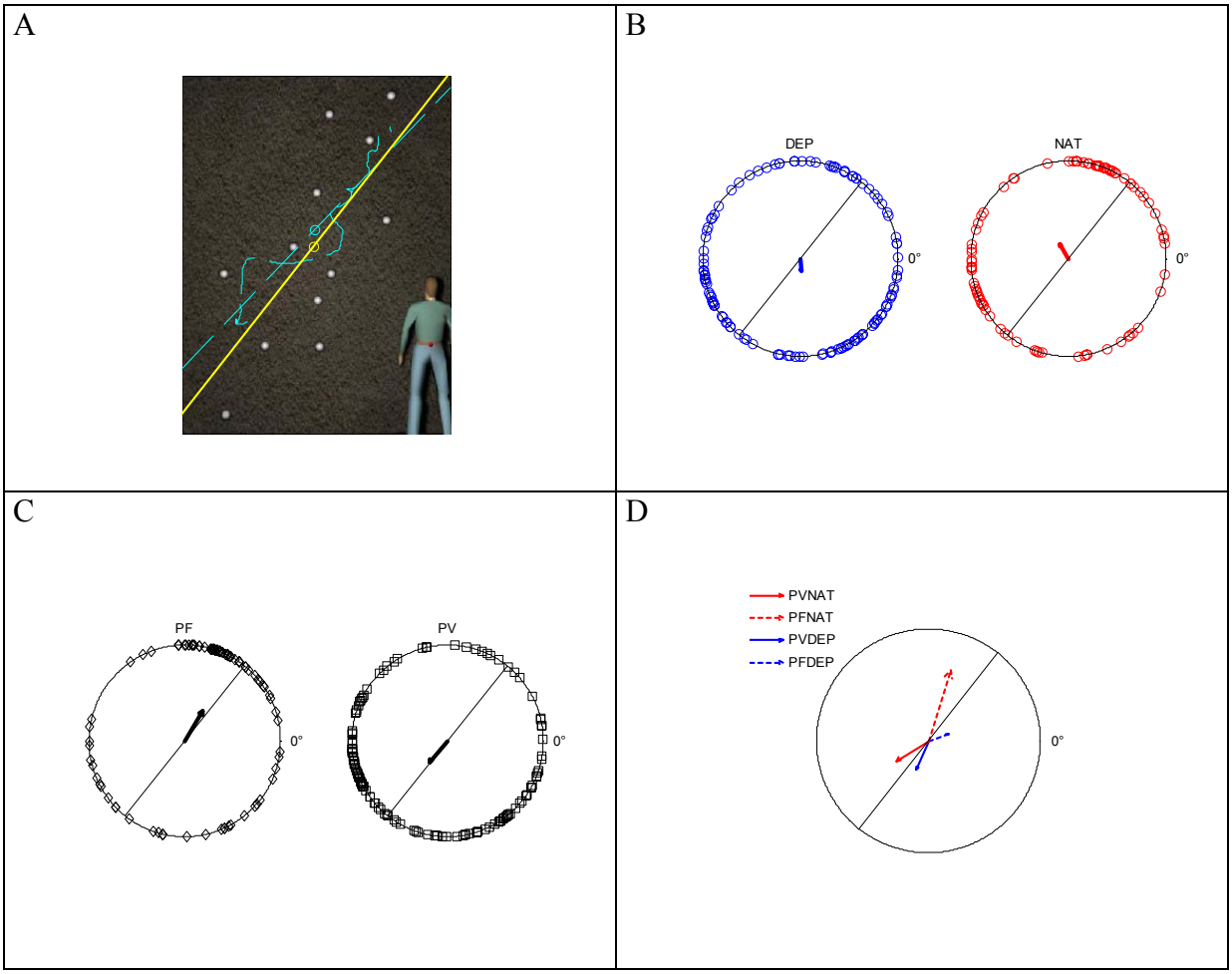


Figure III-14 : (A) Traits pointillés : Trajectoire et droite de régression de la trajectoire, traits pleinS : position des prises et droite de régression des prises. Direction du barycentre de chaque réponse par rapport au barycentre du stimulus et vecteur moyen de l'ensemble de barycentres en fonction du niveau d'expertise (B) de l'absence (PF) ou la présence (PV) des prises (C) et d croisement de ces deux types de facteurs (D). La direction de la droite de régression des prises est superposée sur chaque graphique circulaire.

III -7.13.2.Enveloppe convexe de la réponse.

III -7.13.2.1.Périmètre de l'enveloppe convexe (Figure III-15-A)

Le périmètre moyen relatif est de –50.0 ± 58.0 cm chez les experts et de –77.2 ± 104.8 cm chez les débutants. Ce périmètre n'est pas significativement différent entre ces deux groupes ($F(1,5) = 0,40$, $p>.05$). Par contre, une différence existe entre la condition PFSTATR et la condition PVSTATR ($p<.05$) pour l'ensemble des sujets.

III -7.13.2.2.Aire de l'enveloppe convexe

L'aire moyenne de l'enveloppe des prises cliquées est de –3556 ± -4417 cm² chez les experts et de 5327 ± 8543 cm² chez les débutants. L'aire de l'enveloppe de l'essai 1 est

toujours significativement plus faible que l'aire de l'enveloppe réelle (Figure III-15 B).Mis à part ce point, nous ne notons pas d'effet significatif ni de la condition expérimentale ($F(4,20) = 0,79$, $p>.05$) ni du niveau d'expertise ($F(1,5)=0,17$, $p>.05$).

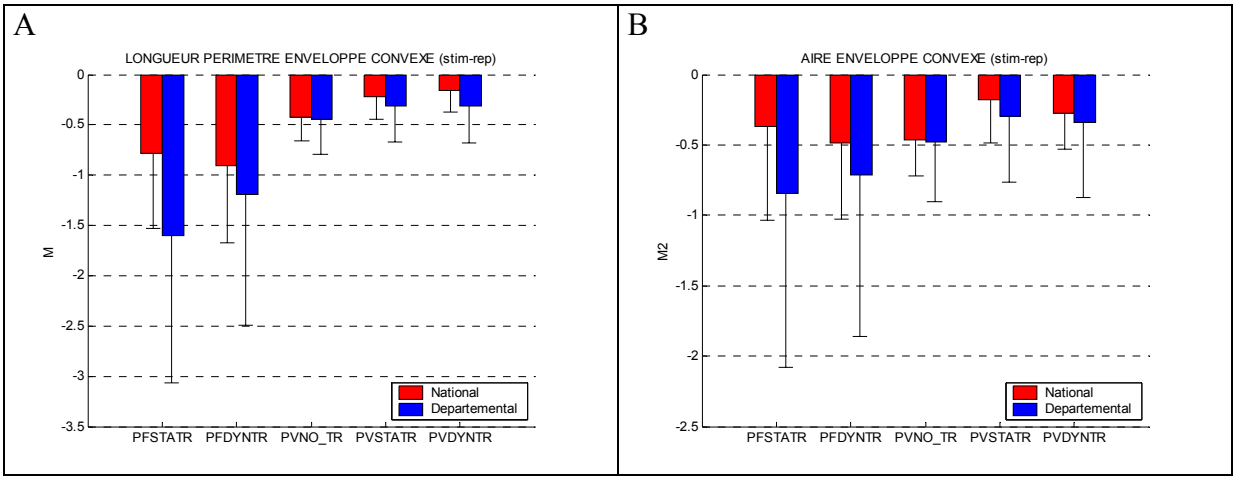


Figure III-15 : A : Histogramme double représentant le périmètre de l'enveloppe convexe de la réponse suivant les conditions, chez les experts(en rouge) et chez les débutants (en bleu). B : Histogramme double représentant l'aire de l'enveloppe convexe de la réponse suivant les conditions, chez les experts (en rouge) et chez les débutants (en bleu).

III -7.13.3.Variable spatiale locale.

La distance moyenne stimulus / réponse est de 30.44 ± 22.49 chez les experts et de 34.50 ± 20.20 chez les débutants. Il n'y a aucun effet significatif de l'expertise sur cette distance ($F(1,5)=1,05$, $p>.05$). Il n'y a pas d'effet du rang de l'essai non plus ($F(5,25) = 1,69$, $p>.05$). Par contre, l'effet de la condition expérimentale est fortement significatif ($F(4,20) = 83,27$, $p<.001$). Les conditions PFSTATR et PFDYNTR (sans prises) sont fortement différentes ($p<.001$) des conditions PVNO_TR, PVSTATTR et PVDYNTR (avec prises). Ceci nous confire donc que les sujets placent beaucoup mieux les prises lorsqu'ils les ont vues précédemment que lorsque qu'ils ont juste vu la trajectoire. Ainsi, les sujets se trompent de 55 cm en moyenne lorsqu'ils n'ont pas vu les prises mais seulement de 10 cm lorsqu'ils les ont vues. Nous retrouvons ici l'effet de blocs déjà observé avec la comparaison des barycentres.

III -8. Synthèse et discussion

Aucun effet de l'expertise n'est systématiquement visible sur l'ensemble du test quelque soit la variable étudiée. Par contre, l'expertise semble souvent jouer un rôle en interaction avec d'autres variables.

Cette interaction est significative autant sur les indices temporels que spatiaux.

La durée totale de la réponse des experts varie en fonction des conditions. Par contre les débutants ne mettent pas moins de temps pour restituer leur réponse pour les conditions PV administrées à la fin du protocole. Nous pouvons penser que les experts mettent beaucoup plus de temps pour PF car ils tentent de traiter l'information donnée par la trajectoire alors que les débutants ne la traiteraient que partiellement.

Au niveau spatial, on retrouve une interaction bloc de condition / niveau dans l'analyse de l'orientation relative du barycentre des prises. En effet, là aussi, la cassure entre les deux blocs (PF *vs* PV) est très visible chez les experts qui sont meilleurs avec les prises alors qu'elle n'apparaît pas chez les débutants. Ceux-ci ont des résultats équivalents tout au long du test ce qui tend à montrer qu'ils accordent la même importance à tous les types d'information. Par contre, les experts sont moins bons que les débutants au début du test (PF). Ceci pourrait s'expliquer par le fait qu'ils sont plus déroutés par les situations pour lesquelles la trajectoire seule est perçue (STAT ou DYN). Ils ne parviennent pas à reconstruire la pertinence de la tâche expérimentale par rapport à leur pratique réelle d'escalade. Il est probable que le mouvement du bassin ne suffise pas à reconstruire mentalement la totalité du mouvement biologique du grimpeur. Par contre, les experts sont meilleurs que les débutants à la fin du test ce qui tendrait à démontrer l'existence de stratégies cognitives de création et de mémorisation d'une image mentale suite à la visualisation d'un pattern de prises.

Des résultats intéressants ont été obtenus en étudiant le poids des conditions sous l'angle de deux blocs d'informations données au sujet. Ces deux blocs se définissent par la présence ou l'absence des prises. Toutes les données spatiales (distance inter barycentre, distance prise réelle – prise cliquée ou orientation du barycentre) convergent pour décrire cette séparation des résultats en deux blocs significativement différents. Cette approche semble donc nous montrer l'importance de la présence des prises dans la construction, la mémorisation et l'utilisation d'une image mentale représentative de la localisation de ces prises. Cela nous montre aussi, contrairement à nos attentes, que la trajectoire n'est à priori pas une information pertinente pour les sujets et qu'il n'y a pas de différence significative entre les conditions "trajectoire statique" et "trajectoire dynamique".

Mais cette séparations par blocs de conditions nous a apporté une information inattendue concernant l'orientation relative du barycentre des prises cliquées par rapport à celui des prises réelles. En effet, il apparaît que cette orientation est fonction d'une part de la direction générale de la trajectoire présentée au sujet et d'autre part du bloc de conditions considéré (PF vs PV). Pour le bloc de conditions PV cette orientation du barycentre est en sens inverse du déplacement du grimpeur, c'est à dire vers le bas. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les sujets apprennent la position des prises et les replacent de bas en haut. Ils pourraient ainsi minimiser les distances entre les prises situées en bas à gauche c'est-à-dire au début de la trajectoire du grimpeur. Cela tendrait ainsi à décaler le barycentre vers le bas et la gauche.

Par ailleurs, le découpage des résultats suivant les deux blocs de conditions pourrait être influencé par le mode même de passation du test. En effet, l'ordre de passation des différentes conditions variait tout en gardant un schéma en deux blocs (PF puis PV). Ainsi, si l'on considère qu'il a pu y avoir apprentissage au cours du test, cet apprentissage pourrait avoir été inhibé par l'ordre aléatoire entre les deux premières et les deux dernières conditions.

Cependant, cette étude présente certaines limites. Cependant, elle peut déboucher sur de nombreuses applications innovantes. Par exemple, l'impact d'orientations diverses de la trajectoire sur la réponse des sujets et la durée de fixation de leur attention sur ce type de test assez long mériteraient d'être étudiés. Nous pourrions également nous demander si le point de vue de l'observateur est une information pertinente par rapport à la création et la mémorisation d'une image mentale fidèle de l'environnement du sportif. En effet nous savons que le déplacement et la mémorisation de l'environnement sont effectués en trois dimensions (natation synchronisée, parapente) et qu'ils sont certainement tributaires des conditions ambiantes (météorologiques, topographiques) ainsi que de la taille du lieu de pratique (course d'orientation, kayak, voile et planche à voile…).

IV - Expérience 2 : Effet d'une simulation préalable de la locomotion et incidence de la géométrie du parcours.

IV -1. Présentation de l'expérience

L'espace bidimensionnel dans lequel nous effectuons nos déplacements en absence de vision subit des déformations ne permettant pas toujours de conserver les relations métriques et topologiques des éléments qui le constituent (zones géographiques, points particuliers, etc.). De plus, lors de déplacements locomoteurs, tout point de l'espace peut théoriquement être atteint par une multitude de combinaisons de translations et de rotations.

Par contre, lorsque ces déplacements sont effectués en situation naturelle (par exemple pour un piéton dans la rue, pour un acteur sur une scène de théâtre, pour un joueur sur un terrain de sport ou un grimpeur sur une falaise), certaines contraintes viennent influencer les sujets de telle sorte qu'ils empruntent un seul trajet ou un sous-ensemble restreint des trajets possibles. Ces contraintes peuvent prendre la forme d'obstacles ou de passages obligés en fonction de l'environnement dans lequel la personne doit évoluer (par exemple la ville et les véhicules qu'il faut éviter ou la falaise et les prises qu'il faut saisir). Elles peuvent également être la conséquence de règlements qui régissent les déplacements comme c'est le cas en sport.

En conditions naturelles, ces contraintes restreignent grandement les possibilités d'utiliser librement n'importe quel trajet mais les trajets retenus restent d'une extrême complexité géométrique (Vieilledent, Dietrich, & Berthoz, 1996; Vieilledent, Dietrich, & Berthoz, 1997). Par ailleurs, nous savons que des techniques de simulation préalable au mouvement basées sur l'imagerie mentale visuelle ou motrice sont utilisées dans le but d'améliorer la performance (en gymnastique, en escalade ou en ski par exemple). Elles permettent d'apprendre et de mémoriser le trajet retenu. Cependant les mécanismes cognitifs qui sont à l'origine de ces optimisations de la performance sont encore peu connus. De fortes analogies ont été trouvées entre la géométrie des images visuelles et celle des scènes qu'elles permettent d'évoquer (Kosslyn, Ball, & Reiser, 1978) ou entre la cinématique des images motrices (Decety, Jeannerod, & Prablanc, 1989 expérience 1) et les mouvements correspondants. Ces analogies sont d'autant plus fortes que les trajets demandés aux sujets sont simples et que les contraintes posturales et motrices qui pèsent sur eux sont faibles (Decety et al., 1989 expérience 2; Decety, 1991).

Dans la présente étude, nous avons cherché à rapprocher les problématiques liées aux déformations de l'espace de la locomotion de celles liées aux effets de la simulation du

mouvement. Pour cela nous avons contrôlé les propriétés géométriques (translation et rotation) des parcours proposés à nos sujets et les techniques d'apprentissage (simulation, pratique effective et repos) de ces parcours.

Nous formulons la double hypothèse de l'effet positif d'un apprentissage par simulation et d'un traitement différencié des translations et des rotations. Pour vérifier ces hypothèses nous tenterons de répondre aux questions suivantes :

Question N°1 : La simulation est-elle plus efficace que le simple repos ?
Question N°2 : La simulation est-elle plus efficace que la marche réelle ?
Question N°3 : La reproduction mémorisée est-elle plus efficace que la marche réelle ?
Question N°4 : La simulation est-elle plus efficace que la reproduction mémorisée ?
Question N°5 : Le sujet traite-t-il séparément les angles et les distances ?
Question N°6 : Quel est l'effet de la géométrie du trajet à reproduire ?

Nous aurons le souci de traiter ces questions en regroupant nos calculs et nos discussions autour des aspects suivants de la performance :

- respect de la forme du modèle proposé lors de la marche.
- reproduction des distances et des angles et précision du positionnement à chaque point intermédiaire du parcours.
- propriétés temporelles de l'apprentissage du parcours et de sa reproduction marchée.

IV -2. Méthodes

IV -2.1.Dispositifs d'acquisition des données

IV -2.1.1.Système de reconstruction des mouvements en 3D

Les coordonnées 3D de points anatomiques particuliers ont été recueillies à l'aide du système optoélectronique infrarouge Vicon 370 (Oxford Metrics, Ltd) à une fréquence d'échantillonnage de 60 images par seconde. Ce système nous a permis de calibrer de façon dynamique un espace de grande dimension dans lesquels nous avons pu enregistrer les mouvements des sujets (Tableau IV --1) afin d'effectuer nos mesures.

Expérience	Caméras	Volume calibré (XYZ)	Résidu de l'erreur de mesure	
			Moyenne (m)	SD (m)
Hexagone	6	10 x 10 x 2.5 = 250 m^3	0.005	0.001

Tableau IV --1: Mise en oeuvre du système d'enregistrement 3D du mouvement, volume calibré et précision des mesures. La précision du système est calculée à partir du résidu de l'erreur du marqueur central placé sur le casque porté par les sujets.

IV -2.1.2.Marqueurs portés par les sujets

Les sujets ont été équipés de marqueurs réfléchissant la lumière émise par des flashs infrarouges. Certains d'entre eux ont été utilisés pour les calculs : ils sont situés sur un casque. Les marqueurs du casque sont placés dans le plan sagittal. Le premier, central, est destiné à enregistrer la position de la tête du sujet dans l'espace. Les 2 autres, antérieur et postérieur, permettent d'enregistrer la direction de la tête. D'autres marqueurs ont été placés sur le sujet afin de reconstruire ses principaux segments corporels. Ils sont situés sur les 2 pointes de pieds, les 2 talons, les 2 genoux, les 2 épines iliaques, les 2 coudes, les 2 poignets, les 2 épaules et au regard de la 5° vertèbre lombaire. Cependant, ils n'ont pas été utilisés directement pour les calculs.

IV -2.1.3.Techniques de datation des événements

Dans cette expérience les sujets ont réalisé des déplacements locomoteurs dans un espace calibré. Entre le début et la fin de ces déplacements nous avons identifié plusieurs événements temporels dont l'occurrence a fourni des bornes aux calculs réalisés sur les variables dépendantes.

Pour cela, les sujets ont eu à signaler leur départ, leur arrivée et leur passage à chaque coin de l'hexagone au moyen d'une télécommande tenue en main. La datation des événements a été réalisée par le sujet lui-même au cours du déplacement. Le signal émis était synchronisé avec les données du système d'enregistrement 3D.

IV -2.2.Variables mesurées

IV -2.2.1.Erreurs locales à chaque cible

Les erreurs locales à chaque cible sont caractérisées par l'éloignement et l'orientation du marqueur considéré par rapport à la cible à un instant donné. L'éloignement rend compte de la distance qui sépare le coin imaginé par le sujet lors de son déplacement du coin réel (modèle). Plus la distance sera proche de zéro et plus le sujet sera précis. Cependant, dans le cas où le coin imaginé et le coin réel ne sont pas strictement confondus, ils sont orientés l'un

par rapport à l'autre dans une direction spécifique (*d*) qui peut se confondre avec la prochaine direction à prendre par le sujet pour continuer son déplacement (*Ned*) ou avec la direction d'où il arrive (*Prd*). Nous avons considéré ces deux cas tout en envisageant la possibilité d'un non alignement entre *d* et *Ned* ou *d* et *Prd* (Figure IV-1).

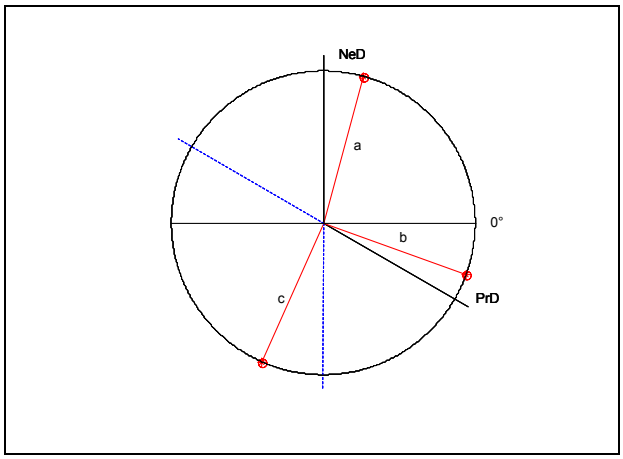


Figure IV-1 : Illustration de la méthode de détermination de l'orientation d'un point par rapport à une cible. Exemples d'orientations comprises entre 0 et 360° par rapport à une cible centrée en (0,0). *Ned* représente la nouvelle direction à prendre (90 °) et *Prd* la précédente (-30 °). Les vecteurs a, b et c représentent 3 orientations possibles par rapport à la cible. Dans le cas c, l'orientation est très différente de *Ned* et de *Prd*. Ces orientations sont tout à fait indépendantes de la distance entre la cible et le point pris en référence pour le calcul.

IV -2.2.2.Analyse spatiale de portions de trajets

Les erreurs spatiales commises sur certaines portions du trajet se décomposent de la façon suivante : reproduction de la corde et reproduction de l'angle lors du changement de direction. Lorsque le but des déplacements locomoteurs est de rallier deux points successifs en ligne droite, nous avons préféré retenir la corde (distance directe entre deux changements de direction successifs) plutôt que la distance parcourue comme indicateur de la précision des translations. En effet, cette variable nous permet de ne pas tenir compte des oscillations du marqueur dans le plan horizontal enregistrées lors de la marche. La corde a été comparée à la longueur de la partie correspondante du modèle. Une valeur de la corde supérieure à celle du modèle a été considérée comme une surestimation de la part du sujet. Inversement, une valeur de la corde inférieure à celle du modèle a été considérée comme une sous-estimation de la part du sujet (Figure IV-2 A).

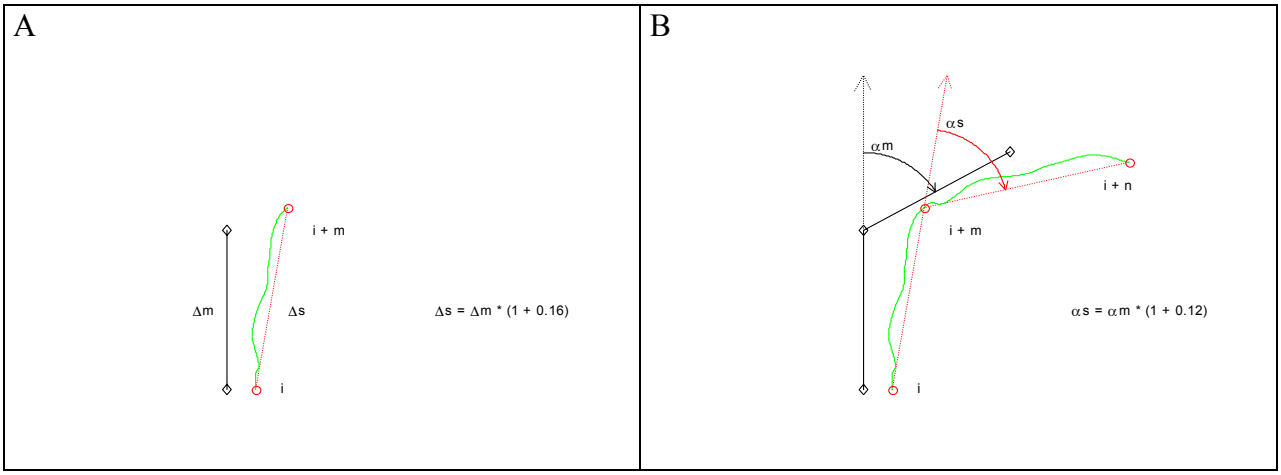


Figure IV-2 : Illustration de la méthode de calcul des erreurs. L'erreur de corde (A) est obtenue à partir de la longueur de la ligne droite virtuelle (---) entre les points de départ et d'arrivée (Δs). Cette longueur est exprimée en pourcentage de la longueur du côté correspondant du modèle (Δm). Dans l'exemple présenté, l'erreur de corde est de 16 %. L'erreur d'angle (B) est obtenue selon le même principe. Nous calculons la rotation du sujet (αs) et exprimons cette valeur en pourcentage de la rotation théorique qu'il aurait du produire s'il avait suivi le tracé du modèle (αm). Ici le sujet a surestimé l'angle de 12%.

Par ailleurs, lors des changements de direction, des erreurs dans l'estimation des angles peuvent intervenir et conduire le sujet à s'éloigner de son but (Figure IV-2 B). Nous avons toujours considéré l'angle extérieur au virage qui représente la quantité de rotation que doit produire le sujet pour changer de direction. Cet angle est calculé à partir d'une série de trois points successifs puis il est comparé à l'angle théorique calculé à partir des 3 points correspondants du modèle. Il peut lui aussi faire l'objet de sur ou de sous-estimations.

IV -2.2.3.Espace exploré lors du déplacement

Lors du déplacement, les positions successives du sujet peuvent être regroupées dans certaines zones privilégiées ou, au contraire, se répartir sur la totalité de l'espace de déplacement. Nous avons quantifié ces stratégies d'occupation par une procédure qui nécessite plusieurs étapes (Figure IV-3). Tout d'abord, nous effectuons un maillage de l'espace calibré et créons une matrice de cellules carrées. Ensuite, pour un trajet ou un groupe de trajets nous calculons le nombre de points échantillonnés présents dans chaque cellule. Enfin, pour pouvoir comparer des trajets réalisés par des sujets différents et/ou des conditions différentes, nous normalisons en divisant les valeurs de chaque cellule par la valeur maximale de l'ensemble des cellules. Nos valeurs sont alors comprises entre 0 et 1. La valeur 1 est attribuée

à la cellule dans laquelle le sujet a passé le plus de temps. La valeur 0 est attribuée aux cellules dans lesquelles il ne s'est pas attardé.

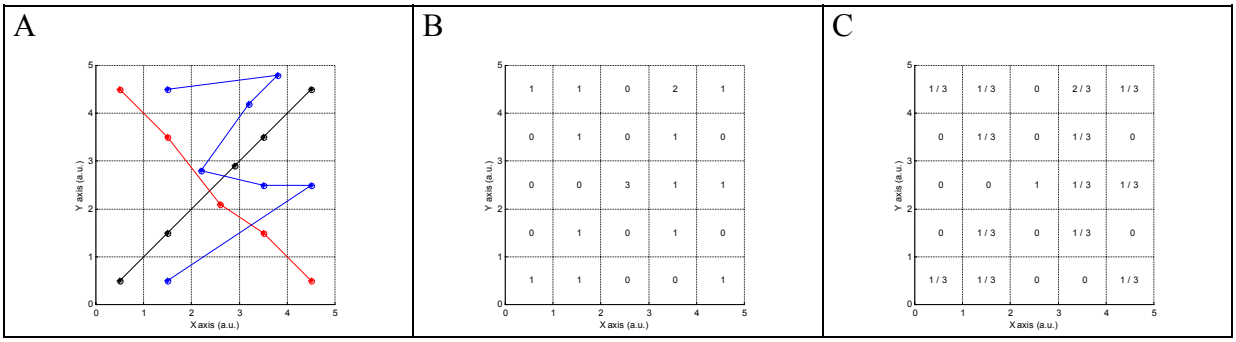


Figure IV-3 : Illustration de la méthode de calcul du taux d'occupation de l'espace pour un ensemble de 3 trajets locomoteurs. L'espace des déplacements est subdivisé en cellules de sorte que chaque point échantillonné appartient à l'une d'entre elles (A). Nous calculons le nombre de points échantillonnés par cellule (B) et une procédure de normalisation est appliquée (C).

IV -2.2.4.Durée du trajet

La présence d'événements temporels a permis de distinguer différentes phases lors des trajets réalisés et/ou imaginés par les sujets. Les durées de ces phases et la durée totale du trajet ont été calculées et analysées.

IV -2.3.Traitements statistiques

IV -2.3.1.Traitement des données linéaires

Les données exprimées en mètre, en seconde ou en pourcentage constituent des variables linéaires. Elles ont fait l'objet d'analyses de variance (Anova) et les comparaisons de moyennes ont été réalisées avec des tests *a posteriori* de Newman-Keuls et des comparaisons planifiées.

IV -2.3.2.Traitement des données angulaires

Lorsque nous avons quantifié la direction d'un segment dans l'espace ou l'orientation d'un point par rapport à un autre, nous avons exprimé les résultats en degrés (de 0 à 360°). Les données ainsi recueillies sont cycliques, leur origine est fixée arbitrairement (0° à l'est par exemple) et leur somme ou leur différence peut sortir de l'intervalle [0 - 360°] préalablement défini. Par conséquent, elles se prêtent difficilement aux calculs linéaires classiques (moyenne, écart type...). Les calculs issus du champ des statistiques circulaires sont mieux adaptés. Ce type de démarche est courant dans les secteurs de la biologie qui s'intéressent à l'orientation et à la navigation des animaux.

Pour ces séries de données angulaires, nous avons calculé un vecteur moyen caractérisé par son orientation (θ) et sa longueur (r) (Batschelet, 1981 p. 7-11; Mardia & Jupp, 2000). Cette longueur, comprise entre 0 et 1 rend compte de la concentration des données autour de la direction moyenne. Des valeurs proches de 0 indiquent une faible concentration par opposition à des valeurs proches de 1 qui indiquent une concentration élevée autour de la direction moyenne. Nous avons utilisé le test d'uniformité de Rayleigh pour déterminer si une série de valeurs angulaires est distribuée aléatoirement ou s'il existe un regroupement selon une direction privilégiée (p. 54-55). En complément, l'intervalle de confiance qui dépend de l'effectif de l'échantillon de données et de la longueur du vecteur moyen nous a permis de savoir si une direction particulière pouvait différer de celle du vecteur moyen (p. 86). Enfin, la comparaison des moyennes de deux effectifs de données circulaires a été réalisée au moyen du test de Watson-Williams (p. 95).

IV -2.4.Formes des trajets locomoteurs

Pour étudier les effets d'une simulation préalable de la locomotion et les incidences de la géométrie du parcours lors de la marche dans un espace représenté, nous avons fabriqué 3 trajets hexagonaux au moyen de poutrelles de bois articulées de 7 cm de large et 3.5 cm de haut (Figure IV-4).

Ces 3 hexagones ont un périmètre de 12.15 m. L'un d'entre eux est parfaitement régulier (Figure IV-4 A), c'est-à-dire que tous ses côtés ont la même longueur (2.03 m) et que tous les angles entre deux côtés successifs sont égaux (60°). Cet hexagone régulier sera nommé RH dans la suite de l'étude. Deux variantes ont également été créées. La première (Figure IV-4 B) conserve les valeurs des angles (60°) entre les côtés mais consiste en une modification des longueurs (1.55 et 2.5 m). Cet hexagone, pour lequel les angles sont préservés sera nommé PA. La seconde variante (Figure IV-4 B) conserve les longueurs des côtés (2.03 m) mais propose une modification des valeurs angulaires entre les côtés successifs (48.5° et 83°). Cet hexagone, pour lequel les longueurs sont préservées sera nommé PD (Tableau IV --2 et Tableau IV --3).

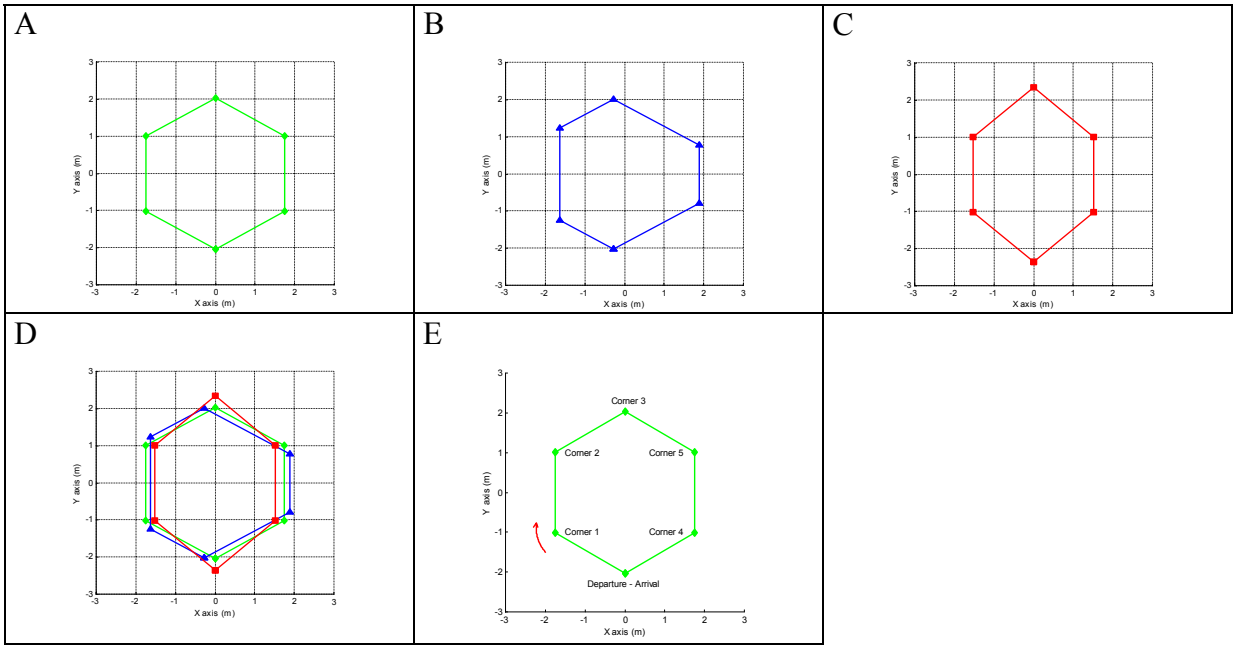


Figure IV-4 : Position des formes hexagonales utilisées comme modèles de stimuli lors des déplacements locomoteurs effectués par les sujets (A, Regular Hexagon; B, Preserved Angle; C, Preserved Distance). L'ensemble des stimuli hexagonaux superposés sont présentés en D. Le point de départ - arrivée et les coins successifs sont indiqués en E. Les sujets se déplacent en sens horaire.

Long (m)	Côté 1	Côté 2	Côté 3	Côté 4	Côté 5	Côté 6
PA	1.55	2.5	1.55	2.5	1.55	2.5
PD	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03
RH	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03

Tableau IV --2 : Longueur des côtés des trajets hexagonaux (m).

Angle (°)	Angle 1	Angle 2	Angle 3	Angle 4	Angle 5
PA	60	60	60	60	60
PD	48.5	48.5	83	48.5	48.5
RH	60	60	60	60	60

Tableau IV --3 : Angles entre deux côtés successifs des trajets hexagonaux (°).

IV -2.5.Sujets

Les sujets de cette expérience étaient 32 hommes volontaires âgés de 22 à 55 ans (Moy = 35.8 ± 10.1). Ils n'étaient pas informés du but de l'expérience. Aucun d'entre eux n'avait pratiqué d'expérience de laboratoire relative à la reproduction de trajets locomoteurs ou à l'imagerie motrice. Chaque sujet a été placé aléatoirement dans un des 5 groupes expérimentaux (voir ci-dessous). Deux sujets dont les performances étaient extrêmement différentes de celles du reste des sujets ont été retirés de la population expérimentales lors des

traitements et analyses. Les données de deux autres sujets n'ont pas été exploitées en raison de problèmes informatiques lors de l'acquisition des données.

IV -2.6.Procédure

Nous avons adopté un plan d'expérience comprenant 3 phases (observation, apprentissage, marche), 3 trajets (PA, PD, RH) et 5 conditions d'apprentissage (G1 à G5). Nous avons réalisé 8 mesures pour chaque sujet et chaque hexagone durant les phases d'apprentissage et de marche. Un même sujet a donc réalisé 2 (phases de mesure) x 8 (répétitions) x 3 (hexagones) = 48 essais.

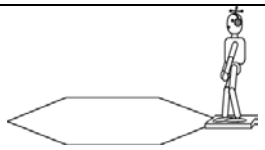
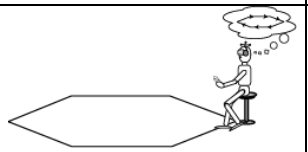
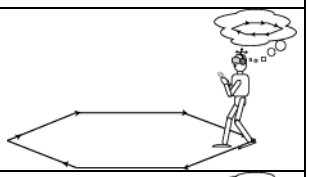
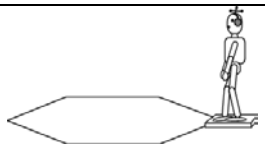
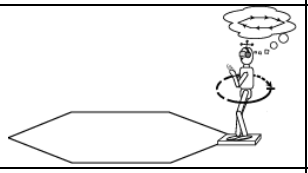
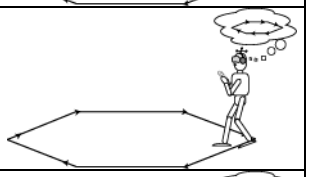
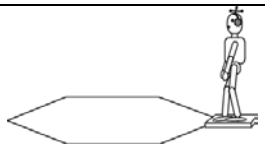
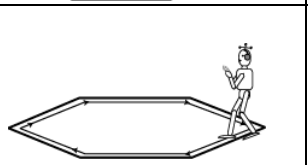
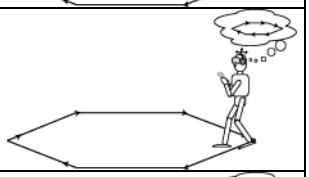
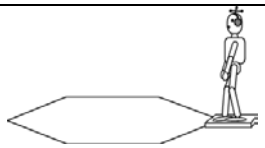
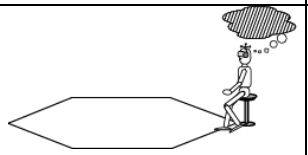
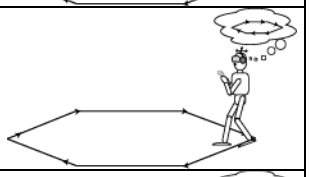
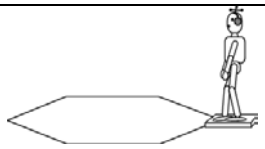
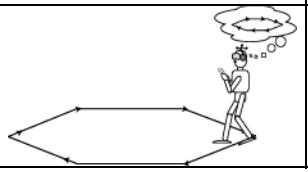
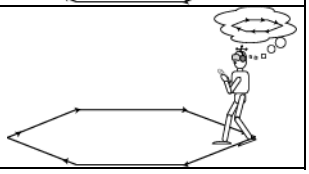
	Observation (2 minutes)	Apprentissage (8 essais)	Marche (8 essais)
Groupe 1			
Groupe 2			
Groupe 3			
Groupe 4			
Groupe 5			

Tableau IV --4 : Récapitulatif des conditions expérimentales en fonction des phases de l'expérience.

Pour chaque trajet, le sujet a observé l'hexagone, l'a appris selon la méthode propre à son groupe puis a marché pour reproduire la forme du trajet (Tableau IV --4). Les essais ont été réalisés par blocs de 8 sur un même hexagone. L'ordre de présentation des hexagones a été contrebalancé entre les sujets d'un même groupe.

IV -2.6.1.Phase d'observation

Cette phase durait 2 minutes. Le sujet se tenait en posture debout sur une plate-forme de 0.8 x 0.8 m^2 située au point de départ. Il voyait le trajet pour la première fois et recevait les consignes sur la tâche à réaliser. En restant sur sa plate-forme, il devait observer l'hexagone et mémoriser la position du départ, des coins (de 1 à 5) et de l'arrivée en sachant qu'il allait devoir s'orienter et marcher en sens horaire vers les coins successifs jusqu'à atteindre le point d'arrivée.

IV -2.6.2.Phase d'apprentissage

Cette phase, différente d'un groupe à l'autre, faisait suite à la phase d'observation.

Groupe 1 : *Simulation sans mouvement* : Assis sur une chaise située au point de départ et orientée vers le coin 1 le sujet devait simuler mentalement sa locomotion. Cette simulation mentale commençait au point de départ et finissait au point d'arrivée. Un trajet direct était requis entre deux coins successifs. Muni de lunettes opaques et d'un baladeur délivrant du bruit blanc, le sujet indiquait son départ mental, ses changements de direction et son arrivée au moyen d'une télécommande synchronisée au système d'enregistrement du mouvement. L'orientation finale requise était parallèle au dernier côté de l'hexagone (Coin 5 - Arrivée).

Groupe 2 : Simulation avec mouvement : Le sujet était debout sur la plate-forme, orienté vers le premier coin. Avec les lunettes opaques et le bruit blanc, il marchait sur place et s'orientait vers les coins successifs. En restant sur la plate-forme, il pouvait seulement tourner sur son axe longitudinal. Aucune translation n'était possible à ce moment de l'expérience. Comme les sujets du groupe 1, il indiquait son départ mental, ses changements de direction et son arrivée au moyen de la télécommande tenue avec les deux mains face à la poitrine. L'orientation finale requise était celle du dernier côté. A la fin de chaque essai le sujet gardait les lunettes et le bruit blanc. Pour qu'il ne dispose d'aucune information sur son orientation, il était alors passivement ramené en position de départ par un expérimentateur selon des rotations aléatoires (sens et quantité). Avant de commencer l'essai suivant, il soulevait ses lunettes pendant quelques secondes afin de regarder le coin 1 et ajuster précisément son orientation.

Groupe 3 : Mouvement contraint : Le sujet marchait réellement sur les poutrelles depuis le point de départ jusqu'au point d'arrivée. Il appuyait sur la télécommande lors de son départ, au passage à chaque coin et à l'arrivée. L'orientation finale était celle du dernier côté.

Groupe 4 : Repos : Le sujet était assis sur une chaise placée au point de départ et orientée vers le premier coin. Il portait les lunettes opaques et le baladeur mais ne simulait pas le trajet mentalement. Il n'utilisait pas la télécommande. Cette phase durait 5 minutes soit la durée nécessaire à la phase d'apprentissage de tous les autres groupes.

Groupe 5 : Reproduction mémorisée : Le sol était complètement dégagé. Le sujet, debout, était placé au point de départ et orienté vers le premier coin. Il devait réellement marcher du point de départ au point d'arrivée en passant par les 5 coins intermédiaires de l'hexagone en portant les lunettes opaques et le baladeur. A l'arrivée il devait s'orienter dans la direction du dernier côté. Il devait donner un signal avec la télécommande au départ, lors des changements de direction et à l'arrivée. Comme pour le groupe 2, le repositionnement au départ était effectué de façon passive par un expérimentateur qui conduisait et réorientait le sujet en empruntant des trajets aléatoires. Juste avant le début de l'essai suivant le sujet soulevait ses lunettes pour affiner sa position de départ et son orientation.

IV -2.6.3.Phase de marche

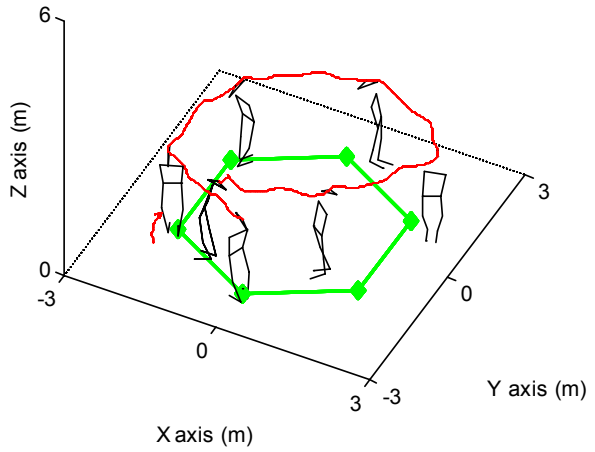


Figure IV-5 : Exemple typique d'un essai réalisé durant la phase de marche. Le sujet se déplace en vision occultée, avec du bruit blanc et il est équipé d'un dispositif télécommandé lui permettant de donner sa position. Nous avons représenté le modèle hexagonal (ici RH), la trajectoire de la tête et la position du sujet au moment du départ, au passage des coins imaginés et à l'arrivée.

Après les phases d'observation et d'apprentissage, les sujets ont réalisé 8 essais de marche réelle (Figure IV-5). Ils ont marché pour reproduire les hexagones en portant les

lunettes opaques et le baladeur. Ils indiquaient leur départ, les changements de direction et l'arrivée avec la télécommande. Ces essais sont identiques aux essais d'apprentissage du groupe 5.

IV -2.7.Variables dépendantes spécifiques à l'expérience

La quantification du degré de similitude entre la forme reproduite par le sujet et la forme du modèle hexagonal a été réalisée par une analyse de régression bidimensionnelle (Cauvin, 1984; Tobler, 1977; Kosslyn, Pick, & Fariello, 1974; Tobler, 1977). Comme dans le cas d'une régression unidimensionnelle, cette procédure permet de calculer un coefficient de corrélation (*R*) et un indicateur de la distance moyenne (*Rmse*) entre les positions du sujet et les points correspondants du modèle.

Les étapes qui permettent le passage d'une série de positions (celles du sujet) à une autre série de positions (celles du modèle) dans des espaces homologues sont au nombre de trois : une translation de longueur *r* et d'angle α qui fait coïncider les centres de gravité des deux séries, une homothétie de facteur λ et une rotation 2D d'angle θ. Les paramètres λ *et* θ sont déterminés pour minimiser (au sens de la méthode des moindres carrés) les distances entre les points des deux séries (Giraudo, 1989).

Dans un premier temps nous avons étudié les valeurs de *R* et de *Rmse*. Ensuite, nous avons étudié les valeurs de chaque paramètre de l'ajustement entre les données du sujet et celles du modèle (r, α, λ et θ).

IV -2.8.Résultats

IV -2.8.1.Trajets reproduits par les sujets

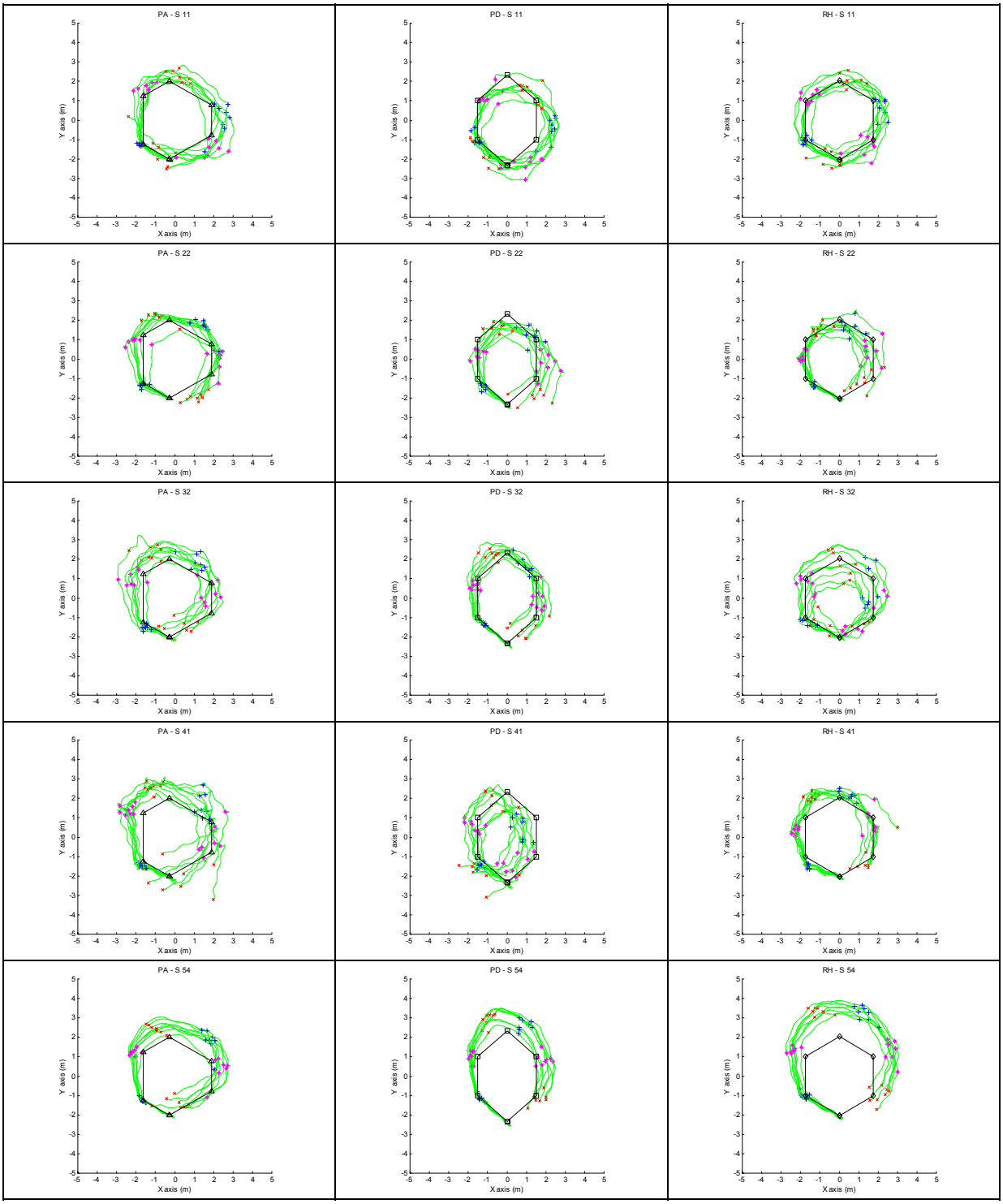


Figure IV-6 : Exemples des 8 trajets superposés d'un sujet de chaque groupe (de haut en bas G1 à G5) pour les hexagones PA (gauche), PD (centre) et RH (droite). Les marques (+, * et x) représentent les coins imaginés et leur position peut être comparée à celle du coin correspondant sur le modèle.

Les trajets reproduits par les sujets présentent une forme à 6 côtés dont l'orientation et la longueur peuvent être très variables (Figure IV-6). Les trajectoires sont très proches du modèle pour le premier côté et commencent à s'en éloigner dès le début du second. Cet éloignement entre le trajet du sujet et le modèle se produit à la suite de mauvaises estimations des rapports angulaires entre côtés successifs ou de la longueur d'un côté. Ces erreurs peuvent se produire de façon simple (angle ou distance) ou combinée (angle et distance) à chaque coin.

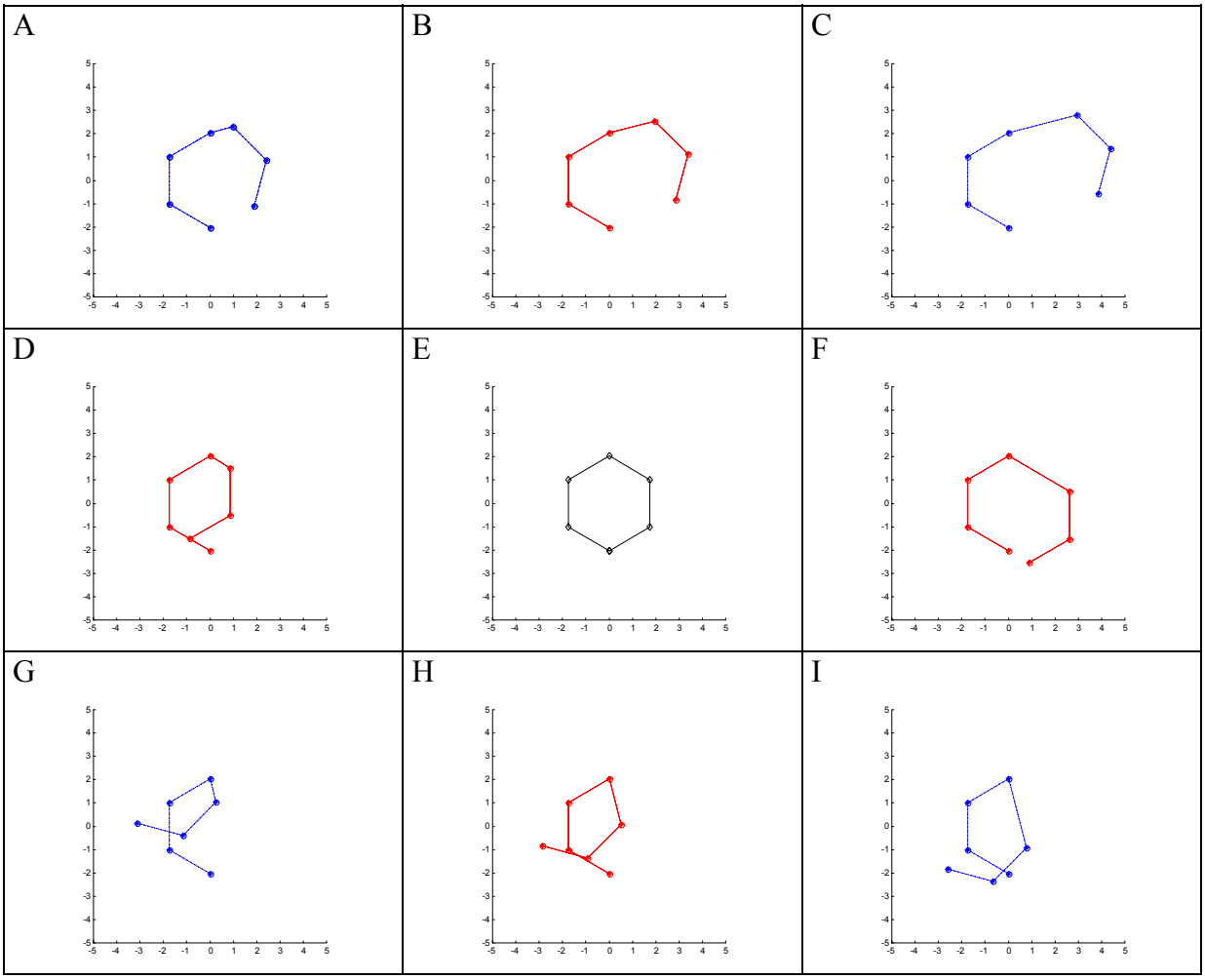


Figure IV-7 : Illustration des différences de trajets pouvant survenir à la suite d'une mauvaise reproduction d'une distance et/ou d'un angle. Nous avons pris l'exemple du 4^{e} côté qui peut subir une surestimation (x 1.5) ou une sous-estimation (x 0.5) et du 3^{e} angle auquel nous avons fait subir une modification de ± 45°. Le modèle est un hexagone régulier présenté en E. Les résultats d'une modification simple du côté 4 sont présentés en ligne 2, les modifications simples de l'angle sont présentées en colonne 2. Les modifications combinées sont présentées en diagonales. A et I correspondent respectivement à une stratégie de sous et surestimation des valeurs. Dans ce cas les points d'arrivée sont très différents et sont séparés d'environ 8 mètres. C et G sont le résultat d'une stratégie mixte de compensation angle/distance. Il faut envisager que ce phénomène puisse se reproduire à chaque coin.

Nous présentons un exemple particulier qui illustre les conséquences, en terme de trajectoire d'une erreur d'angle et/ou de distance (Figure IV-7). La combinaison de ces différents types d'erreurs qui peuvent intervenir à chaque coin conduit à une multitude de points d'arrivée fort éloignés les uns des autres et fort éloignés du point de départ.

Pour nos sujets, il apparaît que les formes des trajets sont :

- soit trop ouvertes (sujet du groupe 2 Figure IV-6 ou cas A, B et C, Figure IV-7)
- soit trop fermées (sujet du groupe 1 Figure IV-6 ou cas G, H et I, Figure IV-7).

Il apparaît également qu'ils sont rarement en mesure de revenir au point de départ. Cependant certains adoptent un point d'arrivée imaginé dont la position est très stable d'un essai à l'autre en reproduisant leur propre performance de façon fidèle (sujet du groupe 2 PA, sujet du groupe 5 PD et RH par exemple). Pour d'autres sujets la position du point d'arrivée imaginé est très différente d'un essai à l'autre (sujet du groupe 1 PA, sujet du groupe 4 PA et PD par exemple).

Ces trajets sont très variés. Une première observation de leurs caractéristiques telles qu'elles ont été présentées ci-dessus ne semble pas permettre une description univoque du comportement de chaque sujet, de différencier son appartenance à un groupe d'apprentissage ou d'identifier la forme du modèle reproduit.

IV -2.8.2.Déformation globale des trajets

IV -2.8.2.1.Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation bidimensionnelle *R* est élevé pour les 3 hexagones (RH : 0.86 ± 0.20, PA : 0.90 ± 0.15 et PD : 0.86 ± 0.16). Ces résultats montrent que la forme de la reproduction reste très proche de la forme du modèle pour tous les hexagones. D'autre part, *R* ne présente pas de différences significatives en fonction des conditions d'apprentissage pour les hexagones RH ($F(4, 21) = 1.03$, $p > .05$), PA ($F(4, 22) = 0.27$, $p > .05$) et PD ($F(4, 23) = 1.00$, $p > .05$). *R* n'évolue pas en fonction du rang de l'essai ($F(7, 140) = 0.45$, $p > .05$).

IV -2.8.2.2.Erreur quadratique moyenne (cm)

Pour l'ensemble des trajets (Figure IV-8), les valeurs de l'erreur quadratique moyenne (Rmse) sont significativement inférieures pour G1 (8.5 ± 2.2), G2 (8.7 ± 1.5) et G3 (8.4 ± 1.4) d'une part par rapport à G4 (9.9 ± 1.7) et G5 (10.3 ± 1.9) d'autre part ($F(1, 20) = 10.17$, $p < .01$).

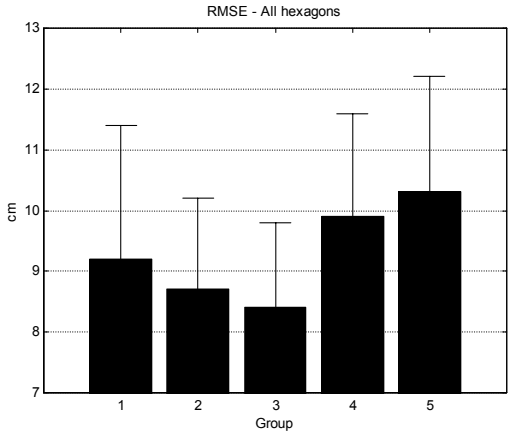


Figure IV-8 : Erreur quadratique moyenne (cm) entre coins imaginés et coins réels après application de la procédure de comparaison de la forme du modèle et de la forme du trajet du sujet pour chaque groupe et tous les modèles de trajets.

Pour RH (Figure IV-9 A), la *Rmse* présente des différences significatives en fonction de la condition ($F(4, 21) = 2.87$, $p < .05$). Les valeurs de *Rmse* sont respectivement de 8.9 ± 2.7, 9 ± 1.3, 8.5 ± 1.4, 10.7 ± 1.4 et 10.9 ± 1.9 cm. Une comparaison planifiée des moyennes fait apparaître deux séries de conditions distinctes. La première série comprend G1, G2 et G3 et se distingue significativement de la deuxième série qui comprend G4 et G5 ($F(1, 21) = 11.21$, $p < .01$). Les conditions d'une même série ne sont pas différentes entre elles.

Pour PA (Figure IV-9 B), les valeurs de *Rmse* des 5 groupes (respectivement de 9.3 ± 2.4, 9 ± 1.5, 8.3 ± 1.7, 9.8 ± 1.8 et 9.63 ± 1.8 cm de G1 à G5) ne sont pas significativement différentes ($F(4, 22) = .93$, $p > .05$). Pour PD (Figure IV-9 C), la *Rmse* (respectivement de 8.8 ± 1.5, 8.2 ± 1.7, 8.8 ± 1.2, 9.3 ± 1.6 et 10.4 ± 1.9 cm de G1 à G5) fait apparaître une différence significative entre G2 et G5 ($F(4, 23) = 2.67$; $p < .05$).

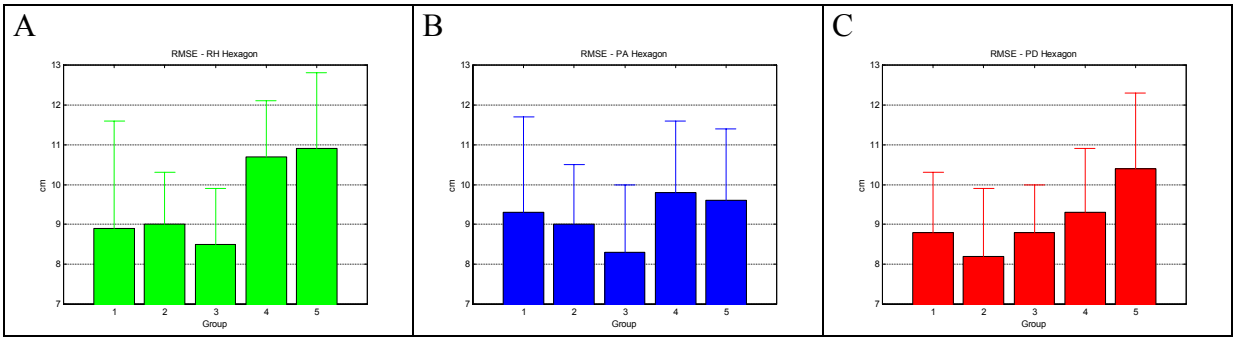


Figure IV-9 : Erreur quadratique moyenne (cm) entre coins imaginés et coins réels après application de la procédure de comparaison de la forme du modèle et de la forme du trajet des sujets pour chaque groupe. Les résultats obtenus pour les hexagones RH, PA et PD sont respectivement présentés en A, B et C.

IV -2.8.2.3.Décomposition de l'ajustement

IV -2.8.2.3.1.Translation du centre de gravité des coins imaginés

Longueur du déplacement (r cm)

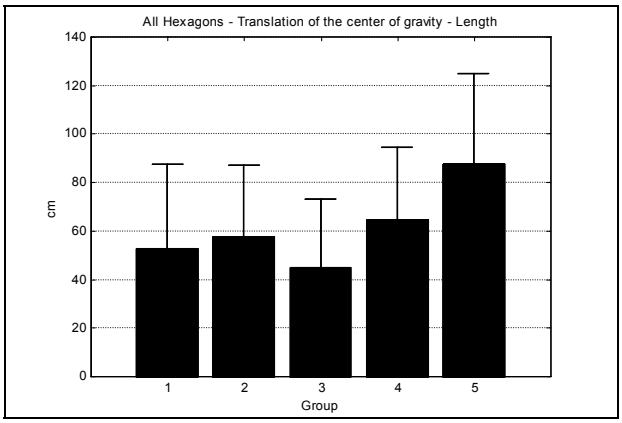


Figure IV-10 : Longueur (cm) de la translation appliquée sur le centre de gravité des coins imaginés pour le faire correspondre à celui des coins réels.

Les données montrent que le trajet reproduit par les sujets a fait l'objet d'une translation globale dont la norme est respectivement de 53 ± 34.8, 58 ± 29.6, 45 ± 28.6, 65 ± 30.0, 88 ± 37.1 cm pour les groupes G1 à G5 (Figure IV-10). La longueur de ce déplacement est significativement différente selon les groupes ($F(4, 20) = 6.47$, $p < .01$). La comparaison des moyennes montre que le groupe 5 produit une translation de longueur significativement plus importante que G1 ($p < .01$), G2 ($p < .05$), G3 ($p < .01$) et G4 ($p < .05$). Une comparaison

planifiée montre que cette différence entre G5 et les autres groupes est principalement observée pour RH ($F(1, 21) = 14.75$, $p < .001$) et PD ($F(1, 23) = 28.22$, $p < .001$). Elle n'apparaît pas pour PA ($F(1, 22) = 1.17$, $p > .05$).

Orientation du déplacement (α °)

Pour l'ensemble des groupes, l'orientation du vecteur centre de gravité du modèle/centre de gravité des coins imaginés varie en fonction des formes d'hexagones (Figure IV-11). Elle est de 52° ± 81° pour PA, de 93° ± 78° pour PD et 104° ± 70° pour RH. Bien que les résultats du test d'uniformité de Rayleigh indiquent une faible concentration des données qui pourrait compromettre la fiabilité des tests de Watson-Williams entre les paires de moyennes circulaires, il semble que deux tendances apparaissent. En effet, les intervalles de confiance (95%) de PA (38° à 66°) ne se superposent pas aux intervalles de confiance des deux hexagones qui présentent une forme symétrique par rapport à l'axe Y de l'espace calibré (80° à 106° pour PD et 93° à 115° pour RH). De plus, la dispersion des mesures n'est pas significativement modifiée par la forme de l'hexagone puisque la longueur du vecteur moyen n'est pas différente entre PA, PD et RH ($F(2, 12) = .26$, $p > .05$).

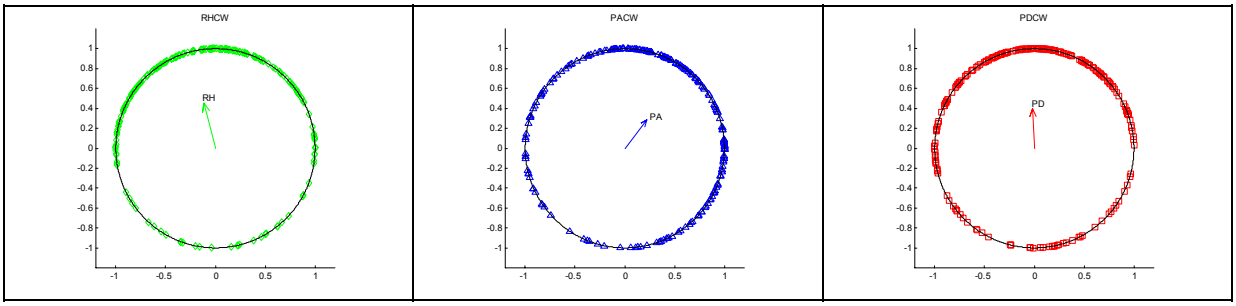


Figure IV-11 : Orientation du centre de gravité des coins imaginés par rapport au centre de gravité du modèle pour chaque hexagone. Tous les trajets des sujets des 5 groupes sont pris dans le calcul du vecteur moyen. Son orientation rend compte de la direction de la translation du centre de gravité. Sa longueur rend compte de la dispersion des mesures. L'origine du tracé est en 0°. Le sens positif est le sens trigonométrique.

Lorsque l'on considère séparément les groupes (Figure IV-12), il s'avère que l'orientation de la translation de G5 est différente de G3 ($F(4, 254) = 7.10$, $p < .01$) et G4 ($F(4, 270) = 14.91$, $p < .001$). L'absence de différences enregistrée entre les autres groupes semble due en partie à une dispersion plus importante des mesures.

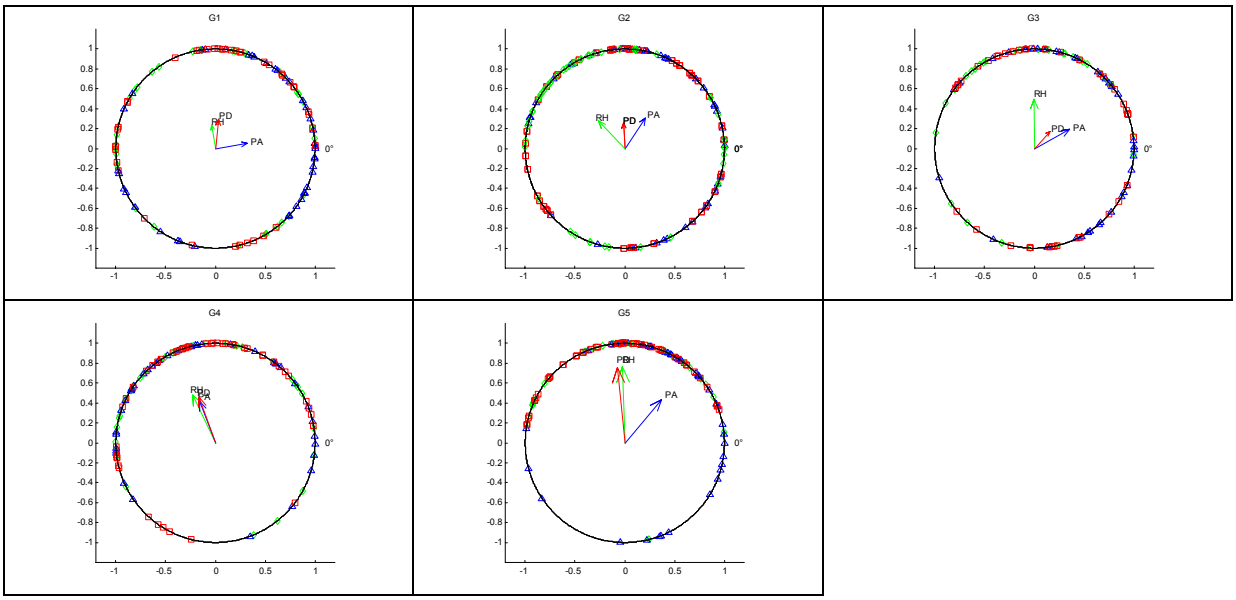


Figure IV-12 : Orientation du centre de gravité des coins imaginés par rapport au centre de gravité du modèle pour chaque groupe. Le vecteur moyen pour les 3 hexagones est décomposé sur chaque figure (RH : ◊, PA : Δ et PD : □) . Son orientation rend compte de la direction de la translation du CG. Sa longueur rend compte de la dispersion des mesures. L'origine du tracé est en 0°. Le sens positif est le sens trigonométrique.

En effet les valeurs des longueurs du vecteur moyen (Figure IV-11) sont respectivement de 0.29, 0.34, 0.38, 0.49 et 0.70 (a.u.) pour G1, G2, G3, G4 et G5. Elles sont significativement différentes ($F(4, 10) = 10.12$, $p < .01$) et la comparaison planifiée des moyennes montre une différence significative entre G5 et les groupes G1, G2 et G3 ($F(1, 8) = 31.40$, $p < .001$), entre G4 et les groupes G1, G2 et G3 ($F(1, 8) = 8.01$, $p < .05$). Enfin la comparaison planifiée des moyennes montre une différence significative entre G4 et G5 ($F(1, 4) = 9.39$, $p < .05$).

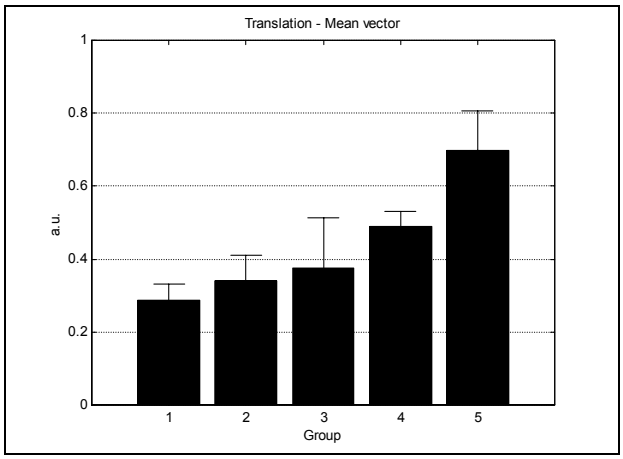


Figure IV-13 : Longueur (a.u.) du vecteur moyen résultant de la translation entre le centre de gravité du modèle et celui du trajet. On note une réduction de la dispersion des mesures depuis le groupe 1 jusqu'au groupe 5 (orientations indépendantes de la norme du déplacement en translation).

IV -2.8.2.3.2.Rotation

Lorsque l'on compare la rotation appliquée sur le trajet pour minimiser les écarts entre les coins imaginés et les coins du modèle pour l'ensemble des hexagones, on observe des différences dues à la condition d'apprentissage (Figure IV-14). La rotation est de 43° ± 39° pour G1, 40° ± 20° pour G2, 47° ± 21° pour G3, 59° ± 35° pour G4 et 48° ± 25° pour G5. La rotation moyenne de G4 est significativement plus importante que celle des autres groupes ($F(1, 246) = 10.01$, $p < .001$; $F(1, 270) = 27.18$, $p < .001$; $F(1, 238) = 9.25$, $p < .001$ et ($F(1, 270) = 8.93$, $p < .001$ respectivement pour G1, G2, G3 et G5). De plus, G2 se différencie de G3 ($F(1, 254) = 5.89$, $p < .001$) et de G5 ($F(1, 286) = 6.42$, $p < .001$). Cependant, ces résultats doivent être nuancés en fonction de la forme du modèle.

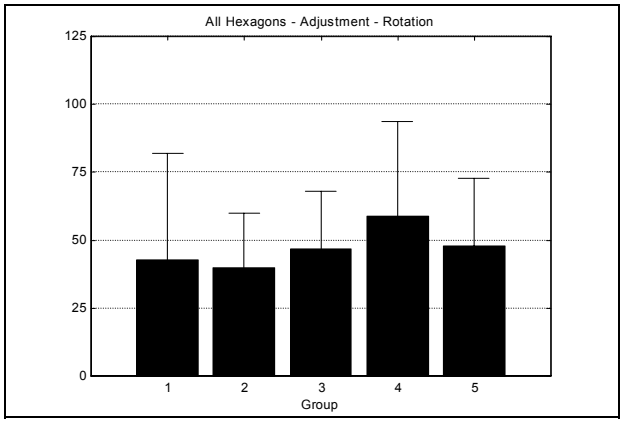


Figure IV-14 : Rotation (°) appliquée aux coins imaginés pour minimiser leur distance par rapport aux coins réels pour l'ensemble des hexagones.

Pour RH (Figure IV-15 A), la rotation appliquée sur le trajet pour minimiser les écarts entre les coins imaginés et les coins du modèle est différente selon le groupe. Elle est de 44° ± 49° pour G1, de 43° ± 25° pour G2, 46° ± 18° pour G3, 74° ± 34° pour G4 et 47° ± 21° pour G5. Les résultats du test de Watson-Williams indiquent que G4 est significativement différent de G1 ($F(1, 77) = 10.38$, $p < .001$), G2 ($F(1, 86) = 20.52$, $p < .001$), G3 ($F(1, 70) = 15.71$, $p < .001$) et G5 ($F(1, 86) = 18.44$, $p < .001$).

Pour PA (Figure IV-15 B), on ne note pas d'incidence de la condition d'apprentissage sur la rotation de l'ajustement entre trajet du sujet et forme du modèle (49° ± 38° pour G1, 41° ± 18° pour G2, 40° ± 23° pour G3, 49° ± 29° pour G4 et 41° ± 17° pour G5).

Pour PD (Figure IV-15 C), deux séries de conditions se distinguent clairement ($F(1, 223) = 14.36$, $p < .001$). Il s'agit de G1 (40° ± 27°) et G2 (37° ± 17°) *versus* G3 (55° ± 21°), G4 (55° ± 37°) et G5 (56° ± 34°).

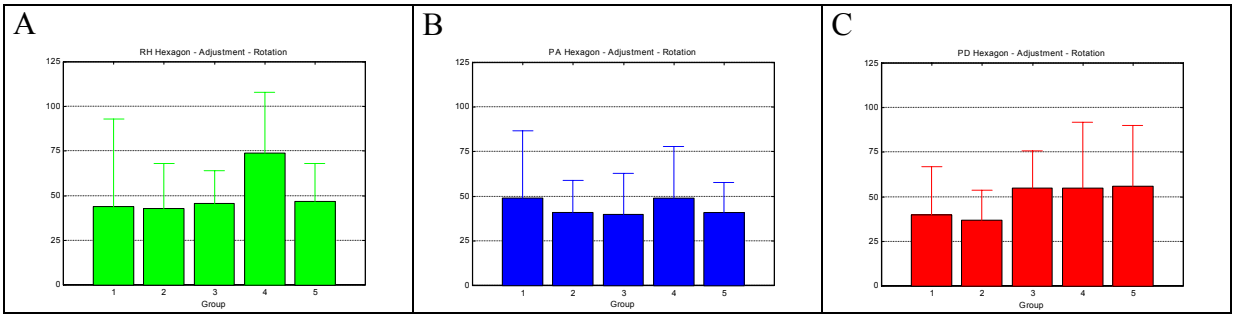


Figure IV-15 : Rotation (°) appliquée aux coins imaginés pour minimiser leur distance par rapport aux coins réels pour les hexagones RH (A), PA (B) et PD (C).

IV -2.8.2.3.3.Homothétie

Le facteur d'échelle appliqué lors de la procédure d'ajustement du trajet des sujets au modèle correspondant est respectivement de 0.83 ± 0.24, 0.90 ± 0.10, 0.89 ± 0.11, 0.77 ± 0.21 et 0.86 ± 0.13, pour G1, G2, G3, G4 et G5. Ce résultat ne fait pas apparaître d'effet de la condition d'apprentissage ($F(4, 20) = 0.66$, $p > .05$) ou de la forme de l'hexagone ($F(2, 40) = 1.56$, $p > .05$).

IV -2.8.3.Analyse spatiale de portions de trajets

IV -2.8.3.1.Erreur de corde (%)

IV -2.8.3.1.1.Erreur de corde totale (%)

La corde du modèle est de 12.15 m pour les 3 hexagones. Nous avons comparé cette valeur à celles produites par les sujets. On constate que tous les groupes surestiment la corde du trajet (12.2 ± 14.1, 6.4 ± 16.4, 2.7 ± 10.0, 13.5 ± 18.0 et 9.3 ± 12.6 % respectivement pour G1, G2, G3 G4 et G5) sans que ces résultats permettent de distinguer significativement les groupes ($F(4, 20) = 0.63$, $p > .05$). De même, la forme du trajet n'intervient pas pour moduler la corde totale ($F(2, 40) = 1.03$, $p > .05$).

IV -2.8.3.1.2.Erreur de corde par côté (%)

Pour l'ensemble des 3 hexagones la décomposition de la corde côté par côté montre des différences significatives ($F(5, 100) = 4.07$, $p < .01$). Cependant ce résultat doit être nuancé en fonction de la forme du trajet.

Pour RH (Figure IV-16 A), on note une différence entre les côtés ($F(5, 105) = 2.52$, $p < .05$). Les comparaisons planifiées ne mettent pas en évidence de différence de surestimation entre le début, le milieu et la fin du trajet. On note cependant que les côtés parallèles au mur de la salle d'expérimentation sont davantage surestimés que les autres ($F(1, 21) = 9.80$, $p < .01$).

Pour PA (Figure IV-16 B), les erreurs de cordes produites sur chaque côté sont significativement différentes ($F(5, 110) = 2.63$, $p < .05$) sans que la comparaison post hoc des moyennes permette d'identifier clairement les différences.

Pour PD (Figure IV-16 C), les erreurs de corde sont significativement différentes selon le côté ($F(5, 115) = 10.09$, $p < .001$). Elles sont respectivement de 2, 11, 4, 2, 9 et 10%. Une comparaison planifiée des moyennes indique que le milieu du parcours (côtés 3 et 4) est significativement moins surestimé que le début (côtés 1 et 2) et la fin (côtés 5 et 6) ($F(1, 23) = 37.78$, $p < .001$). De plus, comme pour RH, les côtés parallèles au mur de la salle d'expérimentation (côtés 2 et 5) subissent une surestimation plus importante que les autres ($F(1, 23) = 20.12$, $p < .001$).

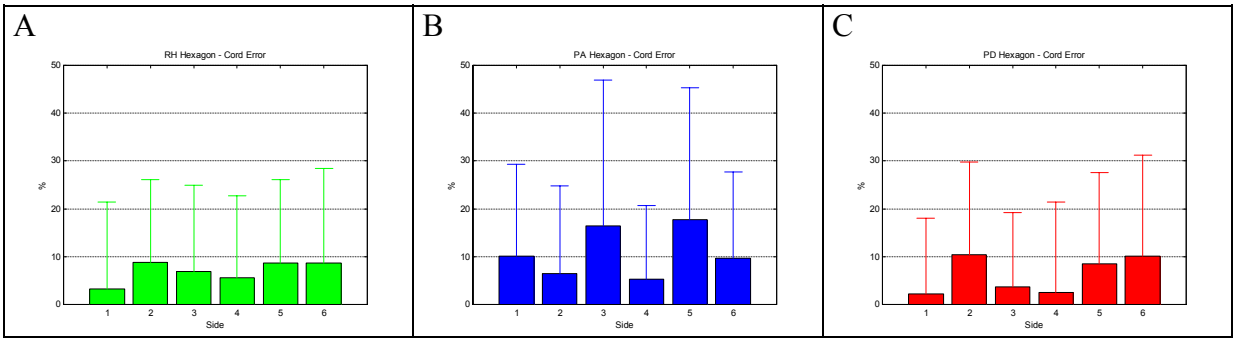


Figure IV-16 : Erreur de corde (%) produite pour chaque côté (de 1 à 6) pour RH (A), PA (B) et PD (C). Nous représentons l'erreur de corde en ordonnée et le numéro du côté en abscisse.

IV -2.8.3.2.Erreur d'angle (%)

IV -2.8.3.2.1.Erreur d'angle totale (%)

La rotation totale théorique est de 300° pour PA et RH et de 280° pour PD. Nous avons comparé cette valeur à celles produites par les sujets. Les performances varient selon les groupes (10.4 ± 21.9, 6.0 ± 21.4, 6.3 ± 17.4, 9.7 ± 19.9 et -2.0 ± 16.1 % respectivement pour G1, G2, G3 G4 et G5) sans que l'on puisse déceler de différence significative ($F(4, 20) = 1.01$, $p > .05$). La forme du modèle semble être un facteur plus déterminant ($F(2, 40) = 3.47$, $p < .05$) pour l'estimation de l'angle (2.5 ± 20.7, 8.1 ± 20.2 et 7.7 ± 18.5 % respectivement pour PA, PD et RH). La comparaison post-hoc des moyennes indique une différence significative entre PA et RH ($p < .05$).

IV -2.8.3.2.2.Erreur d'angle par coin (%)

On observe des différences significatives ($F(4, 80) = 19.51$, $p < .001$) entre les coins en ce qui concerne l'erreur d'angle (Figure IV-17). Les comparaisons post-hoc des moyennes permettent de mettre en évidence 3 séries d'angles qui se distinguent mutuellement ($p.<.01$). La première série comprend les angles 1 et 2 qui sont sous estimés (-9.7 ± 17.3 et -5.5 ± 17.4 %). La seconde est constituée de l'angle 3 qui est largement surestimé (9.5 ± 21.2 %). La dernière est composée des angles 4 et 5 qui sont légèrement surestimés (3.6 ± 21.2 et 2.9 ± 23.8 %).

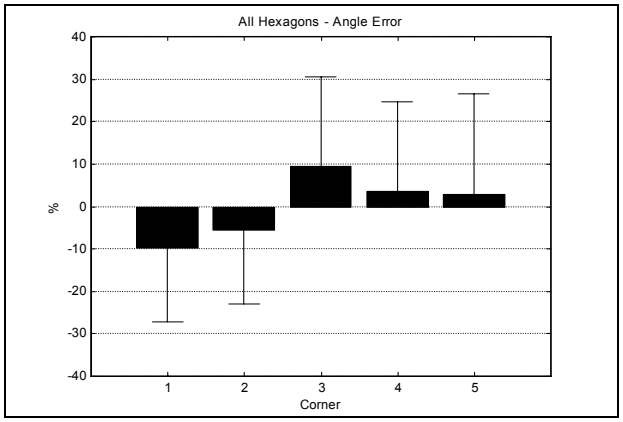


Figure IV-17 : Erreur d'angle (%) produite à chaque coin (de 1 à 5) pour l'ensemble des hexagones. Nous représentons l'erreur d'angle en ordonnée et le numéro du coin en abscisse.

Pour RH (Figure IV-18 A), les erreurs d'angle dépendent aussi du coin au niveau duquel elles sont produites ($F(4, 84) = 10.63$, $p < .001$). Elles sont de -10.6 ± 18.0, -4.0 ± 18.0, 10.2 ± 22.8, 2.7 ± 21 et -1 ± 23.5 pour les coins de 1 à 5. Seule l'erreur d'angle au coin 3 se distingue significativement de toutes les autres erreurs ($p < .001$). Les erreurs aux coins 1 et 2 sont équivalentes ainsi que les erreurs aux coins 4 et 5 ($p > .05$).

Pour PA (Figure IV-18 B), on observe une différence significative ($F(4, 88) = 25.44$, $p < .001$) entre les angles (-10.5 ± 16.2, -10.7 ± 15.8, 17 ± 18.4, -5.6 ± 18.9 et 2.5 ± 22.6 % pour les angles 1 à 5). Pour cet hexagone, les angles 1, 2 et 4 sont sous-estimés et se distinguent de l'angle 5 ($p < .001$) qui, lui-même, est différent de l'angle 3 ($p < .001$).

Pour PD (Figure IV-18 C), les erreurs d'angles sont significativement différentes à chaque coin ($F(4, 92) = 19.23$, $p < .001$). On retrouve clairement une subdivision en 2 séries d'erreurs mutuellement distinctes. Il s'agit de l'erreur d'angle aux coins 1, 2 et 3 (-9 ± 17.8, -2.6 ± 17.4 et -3.4 ± 17.0) et aux coins 4 et 5 (12.7 ± 19.7 et 7.8 ± 24.4 %).

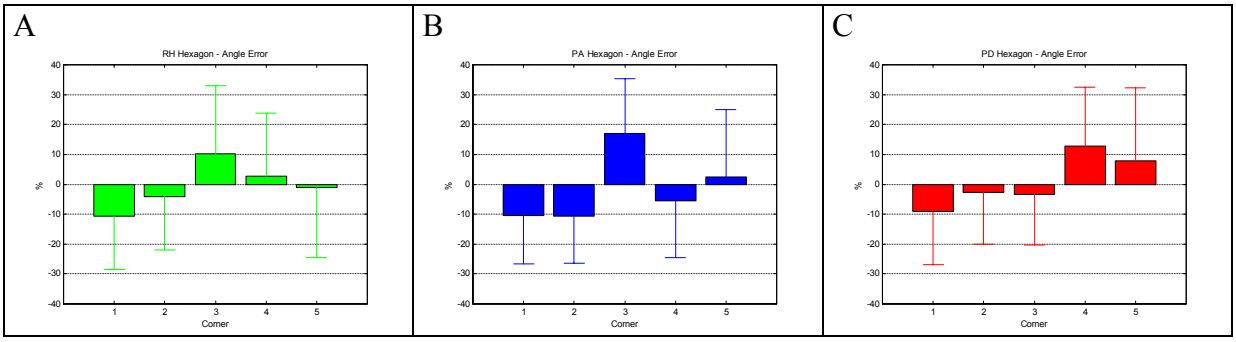


Figure IV-18 : Erreur d'angle (%) produite à chaque coin (de 1 à 5) pour RH (A), PA (B) et PD (C). Nous représentons l'erreur d'angle en ordonnée et le numéro du coin en abscisse.

IV -2.8.4.Espace des erreurs

Les sujets produisent des erreurs lors de leurs déplacements. Elles se traduisent par des sous ou surestimations de la corde et de l'angle à chaque instant. La question peut dès lors se poser de savoir si les erreurs de corde sont corrélées aux erreurs d'angle ou si ces deux types d'erreurs sont produits indépendamment l'un de l'autre. Il devient nécessaire d'analyser l'influence d'une part de la forme du modèle et d'autre part, de la condition d'apprentissage propre à chaque groupe. Pour cela, nous avons décomposé chaque trajet en 3 parties. La première partie correspond à la portion comprise entre le départ et le coin 2, la seconde à la portion comprise entre le coin 2 et le coin 4 et la dernière correspond à la portion comprise entre le coin 4 et l'arrivée. Compte tenu de la forme des modèles, ces trois parties sont d'égale

longueur (4,06 m). L'erreur de corde est exprimée en pourcentage de cette longueur théorique et l'erreur d'angle est calculée à partir du coin correspondant à la portion de trajet analysée (respectivement, coins 1, 3 et 5). Nous présentons les résultats des corrélations dans l'espace des erreurs pour chaque portion de trajet, condition d'apprentissage et modèle (Figure IV-19).

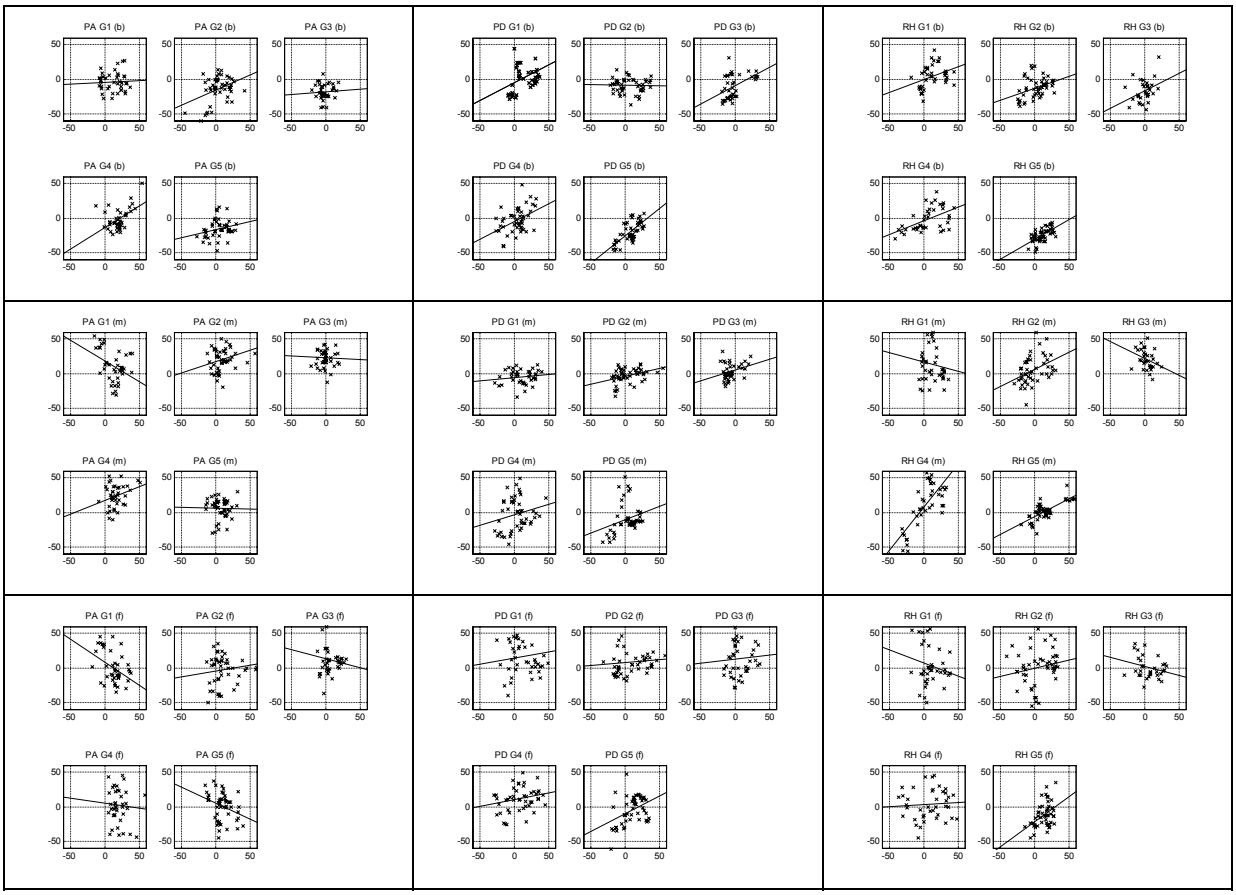


Figure IV-19 : Corrélation entre erreur de corde (%) et erreur d'angle (%) pour les 3 hexagones (colonnes : PA à gauche, PD au centre et RH à droite). Nous avons divisé le trajet en trois parties (lignes : début en haut, milieu au centre et fin en bas). Le début comprend les côtés 1 et 2 et la valeur de la rotation est donnée par l'angle 1. Le milieu comprend les côtés 3 et 4 et la valeur de la rotation est donnée par l'angle 3. La fin comprend les côtés 5 et 6 et la valeur de la rotation est donnée par l'angle 5. Sur chaque figure l'erreur de corde est portée en abscisse et l'erreur d'angle en ordonnée. Elles sont exprimées en pourcentage de la valeur correspondante du modèle.

Les résultats indiquent que la corrélation est très faible entre les erreurs de corde et d'angle (0.19 ± 0.29). L'analyse de variance effectuée sur la transformée de Fisher du coefficient de corrélation indique un effet de la portion de trajet analysée ($F(2, 28) = 13.92$; $p < .001$). On constate une diminution significative des valeurs dès la seconde partie (respectivement 0.39 ± 0.24, 0.23 ± 0.39, 0.02 ± 0.26). Ce phénomène ne permet pas de discriminer significativement les hexagones ($F(2, 12) = 1.50$; $p > .05$) et les conditions d'apprentissage ($F(4, 10) = 1.88$, $p > .05$). Cependant, une comparaison planifiée de G1, G2,

G3 (0.33 ± 0.29) *versus* G4, G5 (0.10 ± 0.26) indique une différence significative ($F(1, 10) = 5.10$; $p < .05$) sur l'ensemble du trajet. Ce résultat suggère la présence d'une meilleure corrélation entre erreur de corde et d'angle pour les groupes qui ont appris le parcours par une méthode de simulation ou de marche contrainte.

IV -2.8.5.Erreurs locales à chaque cible

Les effets observés sur la forme globale du trajet nécessitent d'être complétés par une analyse plus fine des aspects locaux qui conduisent les sujets à se rapprocher ou à s'éloigner du but fixé. Le trajet idéal consistant à rallier le point d'arrivée en passant par chaque coin de l'hexagone, nous avons analysé la précision du sujet par rapport à chaque cible. Pour chacune d'elle nous nous sommes intéressé à l'orientation du coin imaginé par rapport au coin réel et à l'éloignement de l'un par rapport à l'autre.

IV -2.8.5.1.Eloignement par rapport à la cible (m)

Une première série d'analyses montre que si l'on considère l'ensemble des groupes, on ne note pas de différence significative entre les 3 hexagones ($F(2, 34) = 2.08$, $p > .05$). Une comparaison planifiée effectuée sur les groupes montre que G1, G2 et G3 (0.77 ± 0.07 m) sont plus proches ($F(1, 17) = 8.85$, $p < .01$) des coins réels que G4 et G5 (1.06 ± 0.08 m).

Une seconde série d'analyses dont le but était de comprendre le rôle du rang du coin montre un effet cumulatif de l'erreur qui se traduit par un éloignement croissant entre le coin imaginé et le coin réel en fonction de la cible (Figure IV-20 A). En effet, si l'on considère l'ensemble des groupes, l'éloignement augmente de façon significative au fur et à mesure du déplacement du sujet ($F(6, 102) = 57.60$, $p < .001$). La décomposition de cet effet indique que l'augmentation de l'erreur intervient au moment du passage au coin 2 et s'amplifie au coin 3. Elle se stabilise ensuite dans la seconde partie du trajet (Figure IV-20 B) et subit une évolution progressive pour atteindre sa valeur maximale à l'arrivée. Cette tendance cumulative est présente pour les 3 hexagones.

De plus, on note que l'éloignement à la cible croissant au fur et à mesure du déroulement du trajet s'accompagne d'une augmentation très régulière de la variabilité de cet éloignement. Cela se traduit par des différences significatives entre les écart-types de l'éloignement pour chaque couple de cibles considéré ($F(6, 120) = 149.93$, $p < .001$).

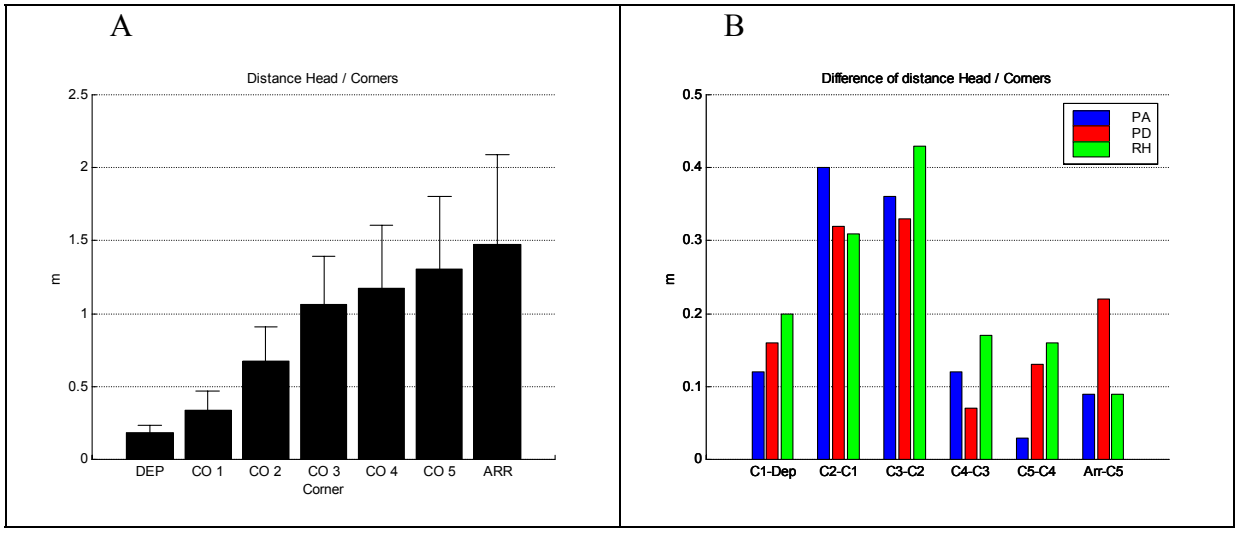


Figure IV-20 : (A) Distance coin réel/coin imaginé (m) au départ, à chaque coin et à l'arrivée. (B) Pour chaque hexagone, la différence d'éloignement entre deux coins successifs est tracée.

IV -2.8.5.2.Orientation du déplacement (°)

Pour chaque hexagone, on constate qu'au départ l'orientation moyenne n'est pas significativement différente d'un groupe à l'autre. De plus, elle correspond à un alignement sur la direction du premier côté à parcourir.

Nous analysons ensuite séparément les orientations par rapport à chaque cible pour les trois hexagones (Figure IV-21).

Dans le cas de RH, l'orientation de départ des sujets de G1 est différente de leurs autres orientations ($F(2, 76) > 13.13$, $p < .001$ pour les coins 1, 2, 3 et 5) à l'exception du coin 4 ($F(2, 76) = 1.72$, $p > .05$) et de l'arrivée ($F(2, 76) = 0.16$, $p > .05$). Les autres comparaisons s'avèrent délicates en raison de la faible concentration des orientations. Ce résultat rend compte d'un comportement peu reproductible par les sujets qui semblent s'orienter de façon aléatoire par rapport à la cible considérée. On retrouve cette nette différence d'orientation de départ par rapport aux autres orientations pour G2 ($F(2, 94) > 6.84$, $p < .01$ du coin 1 à l'arrivée). Les sujets de G3 adoptent une stratégie différente des 2 groupes précédents. L'orientation de départ reste différente des orientations suivantes ($F(2, 62) > 5.62$, $p < .01$ du coin 1 à l'arrivée). C'est également le cas de l'orientation au coin 1 ($F(2, 62) > 11.52$, $p < .01$). Cela traduit un comportement de raccourci au coin 1 pour des sujets qui tendent à rejoindre directement le coin 2. Enfin, on retrouve un comportement peu uniforme et peu reproductible pour G4 alors que les sujets de G5 adoptent des orientations très différentes pour chaque coin

($F(2, 94) > 8.85$, $p < .001$), mais elles traduisent un comportement de détour par l'extérieur de la forme hexagonale depuis le coin 2 jusqu'à l'arrivée.

Dans le cas de PA, les orientations de G1 font apparaître une différence entre le départ et les autres coins ($F(2, 78) > 7.59$, $p < .01$). Cette différence n'est pas significative entre le départ et l'arrivée ($F(2, 78) = 4.03$, $p > .05$), ce qui met en évidence un alignement sur la direction du premier côté à l'arrivée. Pour G2, l'orientation au départ est proche de l'orientation au coin 1 ($F(2, 94) = 0.29$, $p > .05$) et différente de celles aux autres coins ($F(2, 94) > 35.41$, $p < .001$). Cependant, pour le reste du trajet, la faible concentration des orientations rend compte d'un comportement de distribution des coins imaginés autour des coins réels. La stratégie qui consiste à raccourcir le trajet par une orientation à l'intérieur de l'hexagone se retrouve pour G3 au coin 1. Pour ce groupe, les orientations au départ et au coin 1 sont différentes de toutes les autres (respectivement $F(2, 78) > 9.85$, $p < .001$ au départ et $F(2, 78) > 11.82$, $p < .001$). G4 se caractérise par une stratégie très reproductible de détour par l'extérieur de l'hexagone pour les coins 1 et 2 et de raccourci pour les coins 4 et 5. Les sujets de G5 adoptent des orientations très différentes pour chaque coin ($F(2, 94) > 6.52$, $p < .001$). Elles traduisent un comportement de détour par l'extérieur de la forme hexagonale à partir du coin 2 et un alignement sur la direction du dernier côté à l'arrivée.

Dans le cas de PD, l'orientation de G1 au départ se différencie des orientations aux autres coins ($F(2, 78) > 4.22$, $p < .05$). Les autres orientations ne se différencient pas entre elles principalement par manque d'uniformité ce qui rend compte d'une stratégie de distribution des coins imaginés autour des coins réels pour la suite du parcours. On retrouve une tendance similaire pour G2 ($F(2, 94) > 4.73$, $p < .05$) à l'exception de l'absence de différence entre les orientations au départ et au coin 1. La stratégie de G3 semble plus complexe puisque ce groupe privilégie les raccourcis par l'intérieur de la forme du modèle hexagonal. Cela se traduit par une des orientations voisines de $336° \pm 44$ et de $333° \pm 69$ ($F(2, 78) = 0.04$, $p > .05$) aux coins 1 et 2 et de $149° \pm 76$ et $116° \pm 67$ au coin 5 et à l'arrivée ($F(2, 78) = 3.67$, $p > .05$). La faible concentration des orientations aux coins 3 et 4 montre des distributions réparties autour du coin réel (respectivement $332° \pm 112$ et $49° \pm 108$).

On retrouve un comportement peu uniforme et peu reproductible pour G4 à l'exception de l'orientation de départ qui diffère de toutes les autres ($F(2, 94) > 5.31$, $p < .05$). Les sujets de G5 adoptent des orientations très différentes pour chaque coin. Elles traduisent un comportement de détour par l'extérieur de l'hexagone depuis le coin 2 jusqu'à l'arrivée.

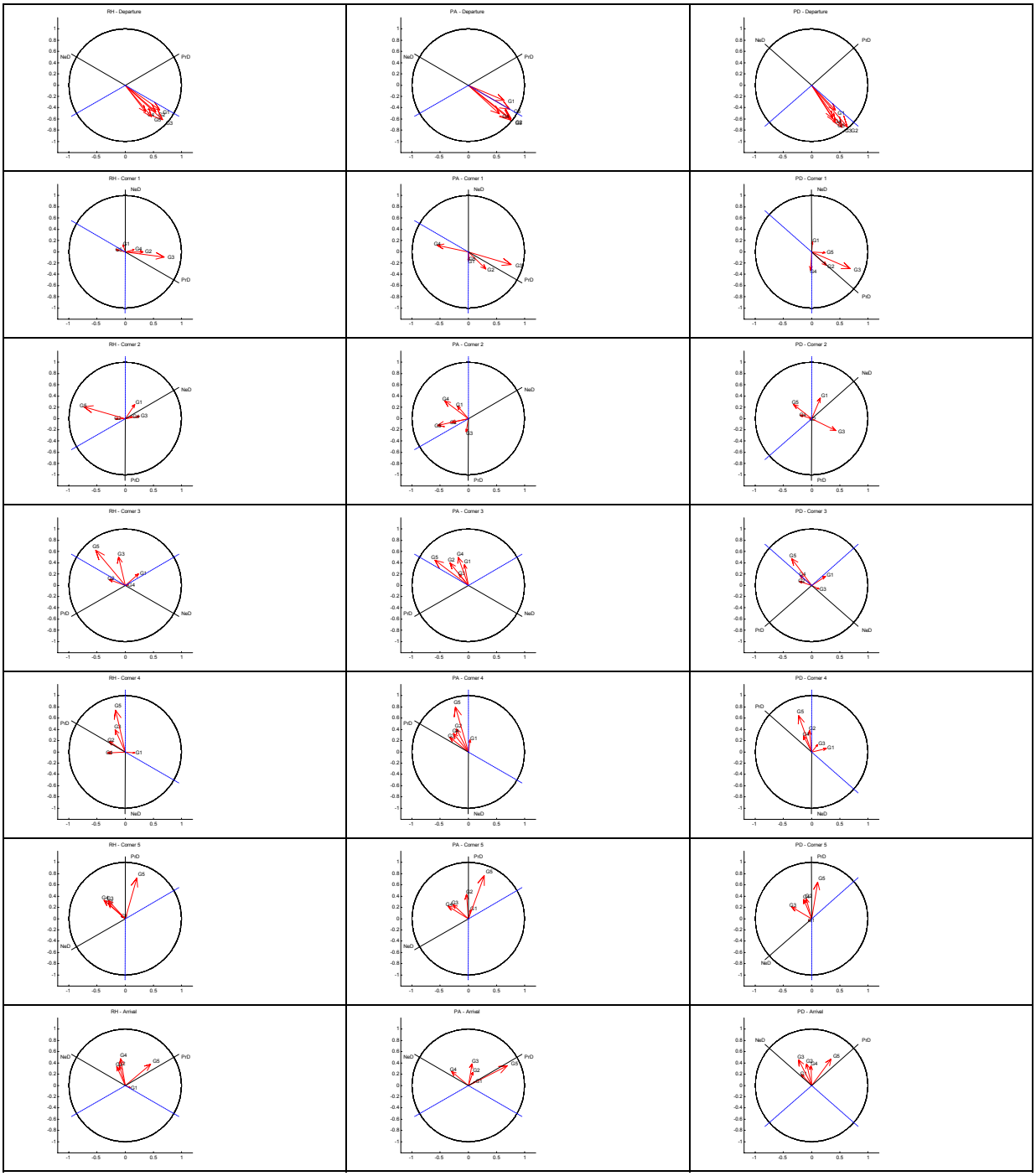


Figure IV-21 : Représentation de l'orientation du coin imaginé par rapport au coin correspondant du modèle (colonnes : RH à gauche, PA au centre et PD à droite). Ces tracés sont réalisés pour chaque coin (lignes de haut en bas : départ, coins 1 à 5 et arrivée). Sur chaque figure et pour chaque groupe le vecteur moyen est donné par la flèche rouge. Les coins sont matérialisés par les traits pleins. PrD et NeD sont les directions précédentes et suivantes. Elles se prolongent par les lignes pointillées bleues.

IV -2.8.6.Espace exploré lors du déplacement

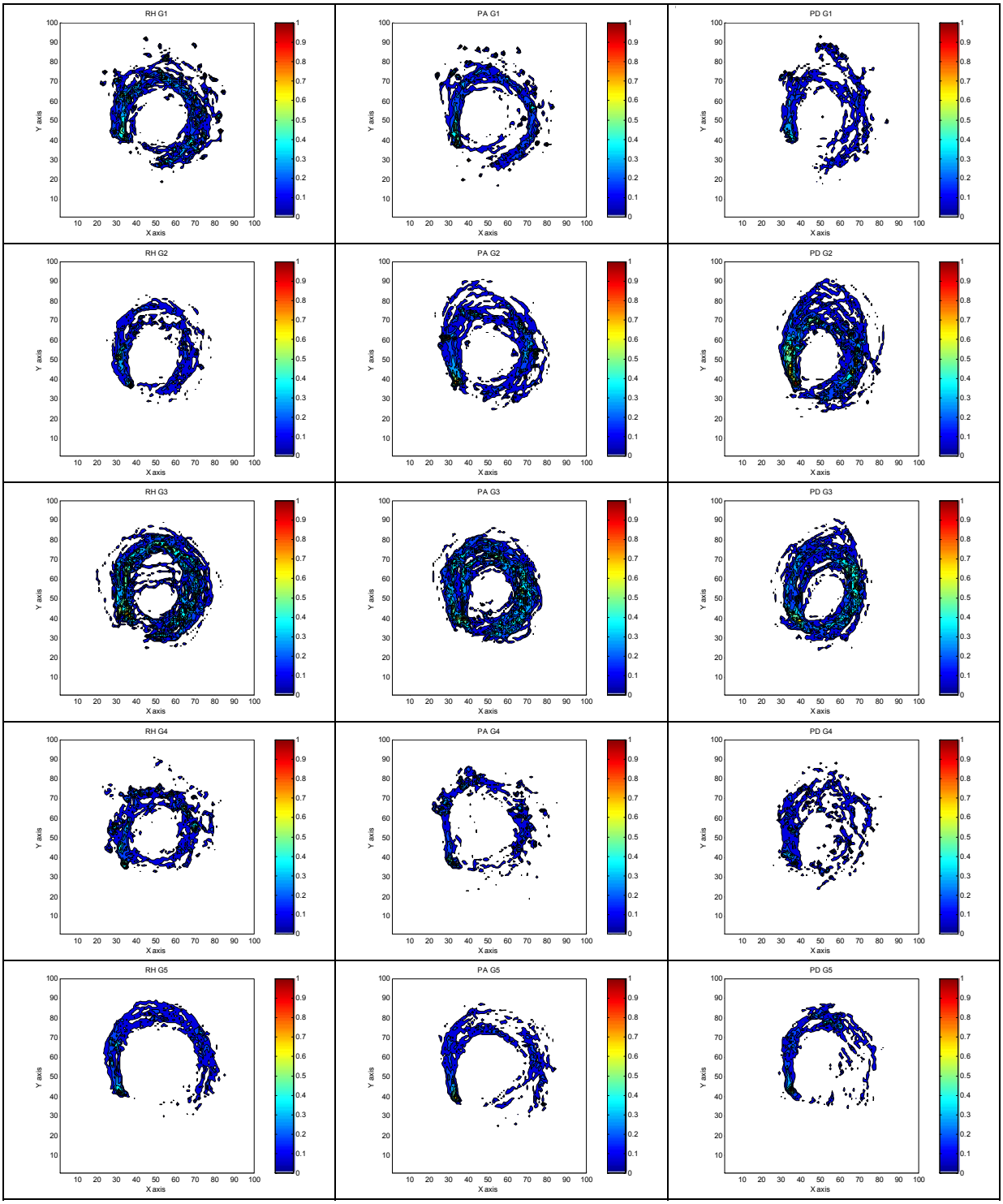


Figure IV-22 : Représentation de l'espace exploré par les sujets de chaque groupe (de haut en bas G1 à G5) pour RH (gauche), PA (centre) et PD (droite). L'espace calibré (10 x 10 m^2) est divisé en 100 x 100 cellules carrées de 10 cm de côté. Les couleurs correspondent au nombre de stations dans chaque cellule après normalisation. Compte tenu du fait que le départ est pris dans la même zone de l'espace pour tous les sujets, nous avons commencé les tracés au moment où des différences peuvent apparaître, c'est-à-dire au coin 1.

Les zones colorées prennent des formes qui s'apparentent à celle du modèle correspondant ce qui tend à renforcer l'idée d'une prise en compte par les sujets de chaque groupe des caractéristiques morphologiques du modèle (Figure IV-22). Bien que des zones colorées apparaissent sur tous les graphiques pour la première partie du trajet, indiquant que les sujets d'un même groupe ont tendance à privilégier les mêmes zones de l'espace, on constate des différences importantes en ce qui concerne le trajet de retour. Sur la deuxième partie du parcours apparaissent deux stratégies d'occupation de l'espace. Dans un premier cas, les sujets continuent à privilégier des "couloirs" de marche qu'ils empruntent systématiquement (exemple RH G5). Dans un deuxième cas, le trajet de retour est balisé par des stations prolongées et/ou nombreuses à certains endroits de l'espace (exemple PD G4). La perte de coloration observée sur la partie finale de certains trajets souligne le fait que la variabilité augmente à mesure que les sujets avancent. Ceci se vérifie principalement dans le cas de trajectoires où les zones d'arrivée ne viennent pas se superposer aux zones de départ (exemple groupes G1 et G5 *vs* G2 et G3).

Compte tenu de la méthode de normalisation utilisée, la présence d'une multitude de cellules de couleurs chaudes sur les graphes de densité est un indicateur d'une importance équivalente accordée aux différentes zones de l'espace. Inversement, lorsque certaines zones sont beaucoup plus visitées que d'autres, les graphes de densité sont très majoritairement colorés en bleu. Enfin, si les sujets n'exploitent pas une partie de l'espace calibré celle-ci n'est pas colorée. De ce point de vue, on constate des différences importantes entre les groupes de sujets. G3 a tendance à occuper toutes les zones de l'espace de façon équivalente. G4 et G5 s'attardent davantage près du coin 1 avant de se déplacer vers la fin du parcours alors que G1 et G2 semblent tenir compte de la forme de l'hexagone pour réguler la durée et/ou le nombre des passages dans chaque zone.

IV -2.8.7.Durée du trajet

IV -2.8.7.1.Données brutes

Le temps nécessaire à l'accomplissement du trajet est compris entre l'instant du départ et l'instant d'arrivée indiqués par le sujet lui-même au moyen de sa télécommande. Ces durées ont été analysées pour la phase d'apprentissage et de marche (Tableau IV --5 et Figure IV-23).

Durée (sec)	G1	G2	G3	G4	G5
RH (app.)	17.6 ± 4.5	16.4 ± 5.1	16.4 ± 4.6		20.2 ± 9.3
RH (marche)	23.3 ± 6.7	17.9 ± 4.0	17.3 ± 5.8	23.5 ± 9.8	17.8 ± 3.4
PA (app.)	19.4 ± 5.4	17.2 ± 3.2	16.4 ± 5.1		18.1 ± 4.4
PA (marche)	24.4 ± 11.7	19.8 ± 4.7	17.0 ± 4.1	28.2 ± 14.7	17.5 ± 3.8
PD (app.)	18.9 ± 3.9	17.6 ± 4.7	16.5 ± 4.3		17.3 ± 6.8
PD (marche)	23.3 ± 7.3	18.4 ± 3.8	16.7 ± 2.6	24.4 ± 11.6	16.7 ± 4.7

Tableau IV --5 : Moyennes et écarts types des durées totales du trajet (s.).

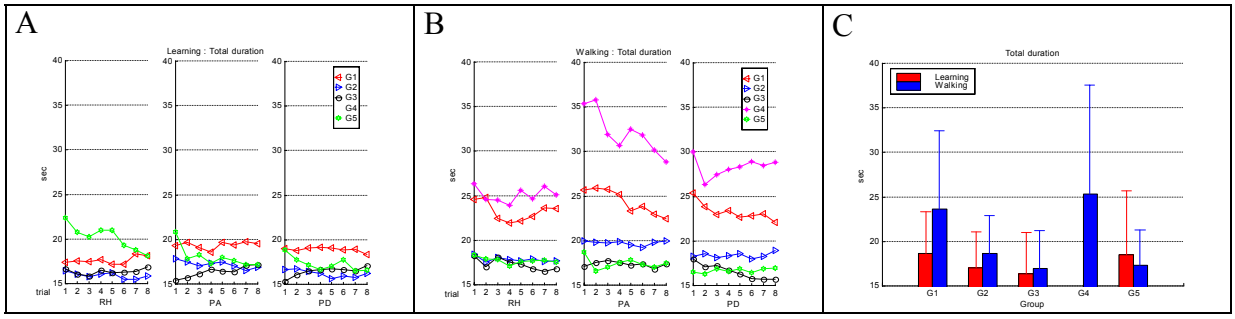


Figure IV-23 : Durée totale lors de l'apprentissage du trajet (A), de la marche (B) et comparaison des durées pour chaque groupe (C). Pour les figures A et B, les hexagones et les essais sont portés en abscisse alors que pour la figure C, il s'agit des groupes. Pour toutes les figures, la durée totale du trajet est portée en ordonnée.

Lors de l'apprentissage (Figure IV-23 A), les résultats montrent que les durées de parcours ne diffèrent pas en fonction de la forme du modèle ($F(2, 34) = 0.26$, $p > .05$) ou du groupe ($F(3, 17) = 0.30$, $p > .05$). On n'observe pas d'effet du rang de l'essai lors de cette phase ($F(7, 119) = 0.46$, $p > .05$).

Lors de la marche (Figure IV-23 B), on observe un effet significatif de la forme du modèle ($F(2, 40) = 4.46$, $p < .05$) qui se traduit par des durées plus importantes pour PA (22.2 ± 9.7 s) que pour les deux autres hexagones (20.7 ± 7.6 s pour PD et 20.3 ± 6.7 s pour RH, $p < .05$). Les résultats de l'Anova n'indiquent pas de différence significative entre les groupes ($F(4, 20) = 1.97$, $p > .05$). Cependant la comparaison planifiée des moyennes des durées de marche de G1, G4 *versus* G2, G3 et G5 fait apparaître des différences significatives entre les groupes qui ont été immobiles lors de leur apprentissage de la tâche et les groupes qui ont pu se mouvoir $F(1, 20) = 7.21$, $p < .05$). Enfin, on observe également un effet du rang de l'essai lors de cette phase ($F(7, 140) = 5.41$, $p < .001$). Une comparaison planifiée des moyennes montre que les sujets prennent plus de temps pour réaliser le premier essai que les autres ($F(1, 20) = 8.85$, $p < .01$).

Lorsque l'on compare les durées entre apprentissage et marche (Figure IV-23 C), on ne constate pas d'effet de la phase expérimentale ($F(1, 16) = 1.95$, $p > .05$), ou de la forme du modèle ($F(2, 32) = 0.79$, $p > .05$). Les résultats n'indiquent pas de différence entre apprentissage et marche pour G2, G3 et G5. Par contre les comparaisons planifiées révèlent une différence de durée de trajet significative entre l'apprentissage et la marche pour G1 ($F(1, 16) = 5.79$, $p < .05$). Ceci est plus particulièrement le cas pour RH ($F(1, 16) = 5.66$, $p < .05$) et PD ($F(1, 16) = 5.47$, $p < .05$) alors que la différence n'est pas significative pour PA ($F(1, 16) = 4.13$, $p > .05$). Bien que les autres sujets aient sensiblement besoin du même temps pour parcourir le trajet lors de l'apprentissage et de la réalisation, les sujets de G1 ne sont pas en mesure, lors de la marche, d'utiliser aussi peu de temps que lors de l'apprentissage (apprentissage : 18.6 ± 4.7 s, marche : 23.6 ± 8.8 s).

IV -2.8.7.2.Corrélation temps de marche *vs* temps mental lors de l'apprentissage

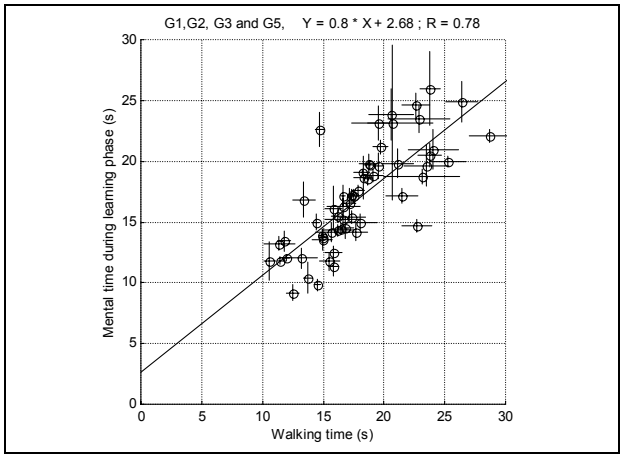


Figure IV-24 : Corrélation entre le temps de marche (s) et le temps mental lors de la phase d'apprentissage (s) pour tous les sujets, hexagones et conditions. Le temps de marche est porté en abscisse et le temps mental en ordonnée.

Lorsque l'on analyse les corrélations entre temps de marche et temps mental lors de l'apprentissage pour tous les sujets et toutes les formes de trajet (Figure IV-24), on constate une forte corrélation entre ces deux variables ($R = 0.78$, $p < .001$). Cependant, on ne peut pas assimiler ce résultat à une parfaite proportionnalité entre le temps mental et le temps de marche. En effet, il faut considérer la valeur de l'ordonnée à l'origine. Cette valeur de 2.7 s rappelle que les sujets ont besoin d'un temps non négligeable pour initialiser leur marche mentale. De plus la pente de la droite de régression n'est que de 0.8 ce qui suggère qu'après ce délai d'initialisation, la marche mentale se déroule plus vite que la marche réelle.

Lorsque l'on s'intéresse aux corrélations pour chaque hexagone, on constate que les coefficients sont élevés (R = 0.79, R = 0.73, R = 0.84 et pour RH, PA et PD avec p<.001). Des temps d'initialisation sont également nécessaires mais ils ne sont pas équivalents pour les 3 types de trajets (3.04 s, 4.8 s et -1.2 s pour RH, PA et PD). En particulier pour l'hexagone PD il semble que le parcours mental puisse être mis en oeuvre avant une initialisation du parcours réel (Figure IV-25 C). Les valeurs des pentes (0.76, 0.7 et 1 pour RH, PA et PD) suggèrent que l'hexagone PD est assimilé à un parcours rectiligne, éventuellement divisé en 2 parties égales. En effet, on retrouve une proportionnalité entre temps mental et temps réel tout à fait similaire aux résultats obtenus par d'autres auteurs pour une tâche de marche en ligne droite dans un monde réel (Decety et al., 1989) ou virtuel (Decety et al., 1996). Les différences enregistrées entre RH (Figure IV-25 A) et PA (Figure IV-25 B) montrent que les modifications de longueur des côtés ont pour conséquence d'une part d'augmenter la durée de l'initialisation de la marche mentale et d'autre part de diminuer la valeur de la pente dans le cas de PA.

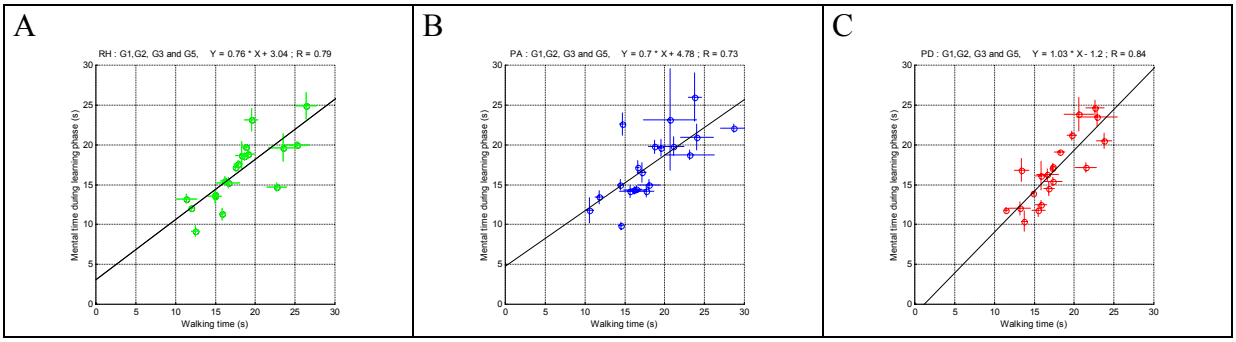


Figure IV-25 : Corrélation entre le temps de marche (s) et le temps mental lors de la phase d'apprentissage (s) pour chaque hexagone (RH en A, PA en B et PD en C). Le temps de marche est porté en abscisse et le temps mental en ordonnée.

Enfin, la comparaison des groupes de sujets montre une absence de durée d'initialisation et une pente très proche de 1 pour G3 (Figure IV-26 C) et G5 (Figure IV-26 D) alors que G1 (Figure IV-26 A) et G2 (Figure IV-26 B) ont besoin d'une période d'initialisation (respectivement 5.6 s et 2.5 s) de la marche mentale et conservent une moins bonne proportionnalité entre temps mental et temps réel (pente de 0.62 pour G1 et 0.79 pour G2).

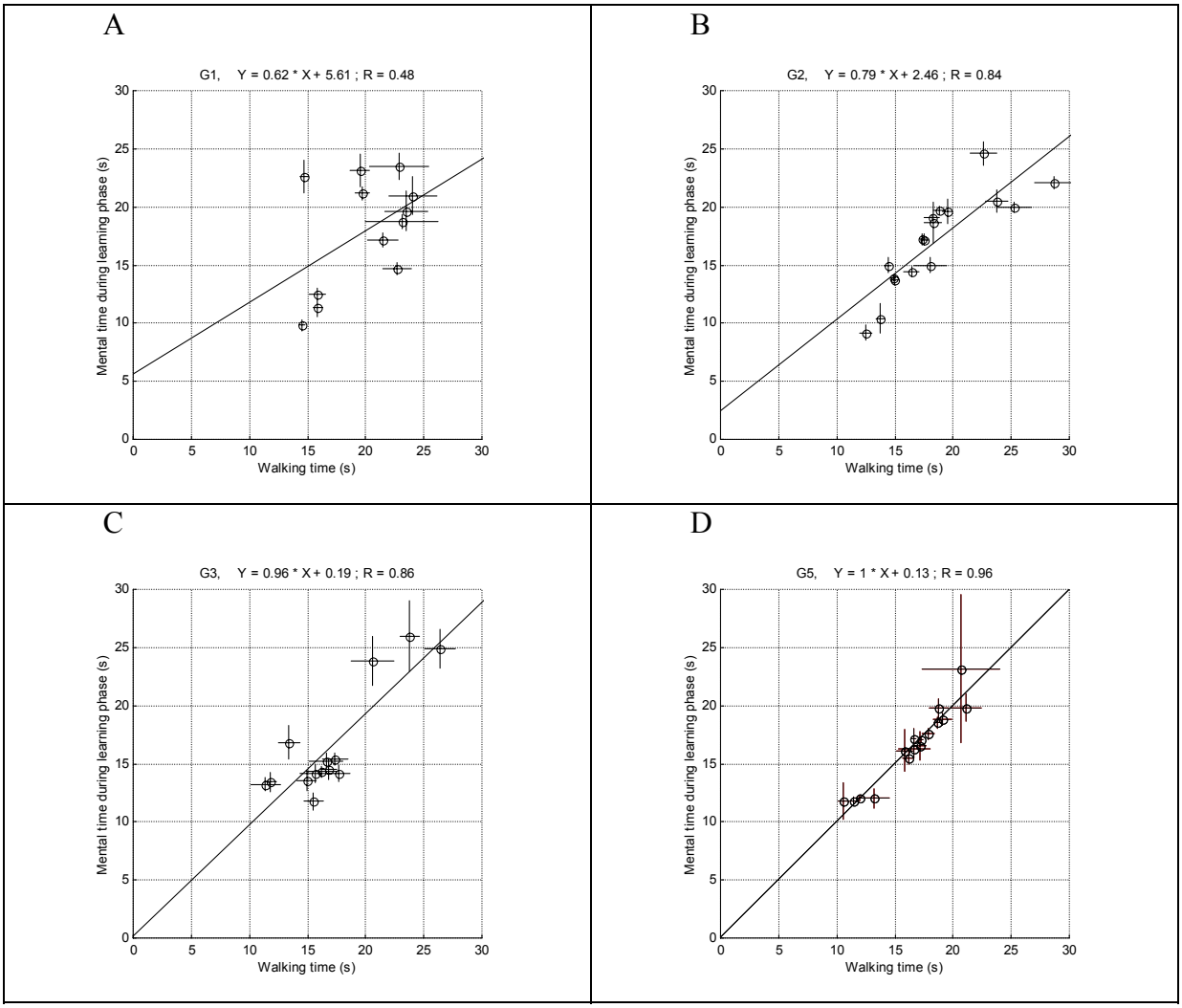


Figure IV-26 : Corrélation entre le temps de marche (s) et le temps mental lors de la phase d'apprentissage (s) pour les 4 groupes qui possèdent des données chronométriques lors des phases de marche et d'apprentissage (respectivement G1, G2, G3 et G5 en A, B, C et D). Le temps de marche est porté en abscisse et le temps mental en ordonnée.

IV -2.9.Synthèse et discussion

IV -2.9.1.La simulation est-elle plus efficace que le repos (G1 et G2 *vs* G4) ...

Nous cherchons à quantifier l'apport d'un apprentissage de la tâche par une méthode de simulation contrôlée par rapport à une activité de repos. Autrement dit, les sujets qui ont préalablement simulé le trajet sont-ils plus efficaces que ceux qui se sont reposé. Si c'est le cas, quelle est la nature de cette amélioration de performance et quels en sont les indicateurs ?

IV -2.9.1.1. ... du point de vue du respect de la forme du modèle ?

La question que nous posons ici est celle de la nature des covariations des coins imaginés par rapport aux coins du modèle. Au plan général, nos résultats montrent des valeurs du coefficient de corrélation plus élevées pour G1 que pour G4 pour RH et des valeurs de *Rmse* plus faibles pour G1 et G2 que pour G4 pour l'ensemble des hexagones et pour RH en particulier. Au plan de la décomposition de l'ajustement, on peut considérer qu'il existe une translation du centre de gravité des coins imaginés de moindre amplitude, une rotation moins prononcée et un facteur d'échelle plus élevé pour G1 et G2 que pour G4.

Il semble donc que la pratique d'une activité de simulation permette de produire une forme plus proche de celle du modèle que le simple repos. Cependant, nous remarquons que la forme du modèle est un facteur important et que les sujets de G1 et G2 éprouvent des difficultés à maintenir les différences enregistrées avec G4 dès que le modèle implique une modification des angles (PA) ou des distances (PD) par rapport à la forme parfaitement régulière (RH).

IV -2.9.1.2. ... pour la reproduction de la corde et des angles et pour la précision par rapport à chaque cible ?

Les résultats obtenus sur les portions de trajets ne permettent pas de mettre en évidence de différences entre G1 et G2 *vs* G4 en ce qui concerne la reproduction de la corde ou des angles. De plus, ces trois groupes ne se différencient pas du point de vue de l'éloignement coin imaginé/coin réel. Par contre, en ce qui concerne l'orientation des coins imaginés par rapport aux coins réels, G1 et G2 se différencient spécifiquement de G4 en fonction de l'hexagone considéré. Pour les hexagones à côtés égaux (RH et PD) les sujets de G4 se positionnent autour des coins réels sans privilégier de direction particulière ce qui n'est pas le cas pour PA où des stratégies de détour puis de raccourci permettent d'opérer une

compensation des erreurs. La modification des distances qui existe pour PA semble contribuer à une systématisation du comportement des sujets qui se sont reposé alors que les trajets des sujets des groupes qui ont simulé restent plus variables.

IV -2.9.1.3.... du point de vue temporel ?

Compte tenu de la condition de repos mise en place pour l'apprentissage de G4, aucune donnée temporelle n'a été enregistrée pour ce groupe lors de cette phase. Néanmoins nous pouvons comparer les résultats temporels pour G1 et G2 *vs* G4 lors de la marche.

Les durées de marche brutes indiquant une différence entre G2 et G4 alors qu'il n'y en a pas entre G1 et G2 suggèrent que la motricité associée à l'apprentissage (G2) permet aux sujets de calibrer la durée de leur déplacement mental et de la réduire par rapport à celle du trajet réel. A l'inverse l'absence de mouvement (G1 et G4) ne semble pas permettre aux sujets d'associer les propriétés de l'image visuelle de la forme du modèle aux propriétés de l'image motrice du déplacement locomoteur nécessaire pour la parcourir.

IV -2.9.2.La simulation est-elle plus efficace que le mouvement réel (G1 et G2 *vs* G3) ...

En fait, il s'agit de savoir si une pratique de simulation (accompagnée ou non de mouvement) favorise une amélioration de la performance lorsqu'elle est appliquée au cas du déplacement sur un trajet locomoteur préalablement observé. Autrement dit, les sujets qui ont préalablement simulé (G1 et G2) le trajet sont-ils plus efficaces que ceux qui ont marché (G3).

IV -2.9.2.1. ... du point de vue du respect de la forme du modèle ?

D'une part, les valeurs très voisines du coefficient de corrélation pour ces trois groupes nous conduisent à penser qu'un apprentissage par simulation a eu des effets comparables à une pratique réelle. D'autre part, les valeurs très élevées enregistrées indiquent que les sujets sont capables de reproduire un trajet très proche de la forme du modèle y compris en ayant simulé. Compte tenu des différences déjà mentionnées entre G1 et G2 *vs* G4, ces résultats renforcent l'hypothèse d'un apprentissage effectif par des techniques de simulation ce qui n'est pas le cas par une simple technique de repos.

Les résultats obtenus sur les paramètres de décomposition de l'ajustement entre modèle et trajet reproduit viennent renforcer l'idée de performances comparables entre ces 3 groupes. En effet, on n'observe pas de différences dans les amplitudes et directions de la translation ce qui se traduit par l'égalité des longueurs du vecteur moyen. Il s'avère que les

orientations du centre de gravité des coins du trajet sont réparties harmonieusement sans que les sujets privilégient telle ou telle direction. Ce n'est pas le cas de G4 et G5. La différence éventuelle entre ces groupes se situe au niveau de la rotation puisque G2 est différent de G3 mais on peut probablement attribuer cette différence à la pratique d'apprentissage de G2 qui consistait justement à produire des rotations.

IV -2.9.2.2. ... pour la reproduction de la corde et des angles et pour la précision par rapport à chaque cible ?

Les erreurs de corde et d'angle ne permettent pas de rendre compte d'éventuelles différences entre les 3 premiers groupes de notre expérience. Cependant, l'analyse des corrélations entre erreur de corde et d'angle semble indiquer que ces 3 groupes obtiennent, d'une part des résultats comparables et d'autre part différents de ceux de G4 et G5.

En considérant l'ensemble des cibles, même si les orientations coins imaginés/coins réels ne discriminent pas les groupes, ce résultat est renforcé lorsque l'on considère l'éloignement coins imaginés/coins réels à chaque cible. Il est comparable pour G1, G2 et G3 et plus faible que pour G4 et G5.

Cependant, en considérant les cibles séparément, on constate que G3 adopte une stratégie de raccourci au début du trajet en se dirigeant prioritairement vers le coin 2 alors que ce n'est pas le cas pour les 2 groupes qui ont simulé. La simulation a donc permis à ces 2 groupes de produire des trajets corrects dès leur initialisation alors que G3 se rapproche du modèle plus tardivement.

IV -2.9.2.3. ... du point de vue temporel ?

On n'observe pas de différence entre les groupes lors de la phase d'apprentissage mais, par contre, lors de la phase de marche on retrouve le même type de résultats que ceux déjà enregistrés en comparant G1, G2 vs G4. Ici aussi, les durées de marche brutes très proches entre G2 et G3 et très différentes entre G1 et G4 suggèrent que la motricité associée à l'apprentissage (G2) permet aux sujets de calibrer la durée de leur déplacement mental. A l'inverse l'absence de mouvement (G1) ne permet pas aux sujets de ce groupe de rapprocher leur marche réelle de celle des sujets de G3.

IV -2.9.3.La reproduction mémorisée est-elle plus efficace que le mouvement réel (G5 *vs* G3) ...

Nous cherchons à quantifier l'apport d'un apprentissage de la tâche utilisant une méthode de marche réelle contrainte (poutrelles) par rapport à une méthode basée sur la

mémoire de la forme observée. Autrement dit, les sujets qui ont réellement marché sur des poutrelles pour apprendre la tâche sont-ils plus efficaces que ceux qui ont marché sans contrainte sur un sol plat. Si c'est le cas, quelle est la nature de cette amélioration de la performance et quels en sont les indicateurs ?

IV -2.9.3.1. ... du point de vue du respect de la forme du modèle ?

G3 et G5 produisent des trajets dont la forme est proche de celle du modèle sans que l'on puisse noter d'incidence de la condition d'apprentissage. Cependant les données de *Rmse* mettent en évidence un éloignement coins réels/coins imaginés plus important pour G5 que pour G3 dans le cas de RH. Cela renforce l'idée d'une interaction entre les conditions d'apprentissage et la géométrie du modèle puisque l'on n'enregistre pas ce type de résultats dès que la régularité de la forme (côté ou angle) est modifiée.

Ce résultat est obtenu par une translation d'amplitude plus importante pour G5 que pour G3 observée principalement pour RH et par une concentration des orientations plus marquées pour G5 que pour G3 quel que soit l'hexagone. On trouve confirmation de ce résultat en analysant les valeurs de vecteur moyen qui restent plus importantes pour G5 que pour G3 et renforcent l'idée d'un meilleur apprentissage du trajet lors de la marche contrainte (G3) que lors de la marche non contrainte mais effectuée sur la base de la mémoire de la forme (G5).

IV -2.9.3.2. ... pour la reproduction de la corde et des angles et pour la précision par rapport à chaque cible ?

L'absence de différences d'erreur de corde et d'angle enregistrée précédemment se confirme entre G3 et G5.

Par contre, les orientations par rapport à chaque cible semblent opposer radicalement les sujets de ces deux groupes puisque les stratégies de raccourci par l'intérieur du modèle sont privilégiées par G3 alors, qu'à l'inverse, les stratégies de détour par l'extérieur du modèle sont principalement employées par G5.

IV -2.9.3.3. ... du point de vue temporel ?

Lors de l'apprentissage, on ne note pas de différences de durée de mouvement pour les deux groupes. Il en est de même pour la phase de marche. De plus, ils ont sensiblement besoin du même temps pour l'apprentissage et la marche ce qui met en évidence une très bonne corrélation entre temps mental et temps réel.

IV -2.9.4.La simulation est-elle plus efficace que la reproduction mémorisée (G1 et G2 *vs* G5) ...

Nous cherchons à quantifier l'apport d'un apprentissage de la tâche utilisant une méthode de simulation contrôlée par rapport à une activité de reproduction mémorisée. Autrement dit, les sujets qui ont préalablement simulé le trajet sont-ils plus efficaces que ceux qui ont directement répété la tâche de marche en guise d'apprentissage ? Cette condition d'apprentissage contraignait le sujet à produire son trajet en s'appuyant principalement sur la représentation mémorisée de la forme du modèle élaborée à la suite de l'observation.

IV -2.9.4.1. ... du point de vue du respect de la forme du modèle ?

Nos résultats montrent que le coefficient de corrélation bidimensionnelle ne subit pas de variations significatives entre G1 et G2 *vs* G5. Cependant, les données de *Rmse* montrent que l'apprentissage par simulation (G1 et G2) conduit les sujets à minimiser les distances qui séparent les coins imaginés des coins du modèle. Ce n'est pas le cas pour un apprentissage par reproduction mémorisée (G5). On retrouve là des résultats déjà mentionnés selon lesquels d'une part la simulation apporte un gain de performance par rapport à un apprentissage sans feed-back sur le mouvement et d'autre part le gain de performance est observé pour une forme régulière (RH). En effet, les valeurs de *Rmse* obtenues pour PA et PD ne permettent pas de discriminer finement les groupes.

IV -2.9.4.2. ... pour la reproduction de la corde et des angles et pour la précision par rapport à chaque cible ?

Les erreurs de corde et d'angle enregistrées pour G1 et G2 ne permettent pas de les distinguer de G5. Cependant, on constate que l'éloignement coin imaginé/coin réel est minimisé à la suite d'un apprentissage par simulation (G1 et G2) par rapport un apprentissage par reproduction mémorisée de la forme du modèle (G5). Les orientations des coins imaginés par rapport aux coins réels sont en accord avec les distinctions déjà mentionnées entre G1 et G2 *vs* G5. En effet, G1 et G2 adoptent une stratégie qui les conduit à ne pas privilégier de direction particulière entre les coins réels et imaginés alors que les orientations des sujets de G5 diffèrent nettement à chaque coin. Les sujets de ce dernier groupe semblent contourner le modèle par l'extérieur.

IV -2.9.4.3. ... du point de vue temporel ?

Lors de l'apprentissage, on ne note pas de différences de durée de mouvement pour G1 et G2 par rapport à G5. Par contre, lors de la phase de marche, on retrouve des différences

importantes entre G1 et G5 alors qu'elles n'existent pas entre G2 et G5. Là encore, l'augmentation importante de la durée de marche pour G1 renforce l'idée du rôle joué par le mouvement lors de l'apprentissage pour calibrer la durée de la marche réelle y compris dans le cas d'un mouvement effectué uniquement à partir de la mémoire d'une forme observée.

La comparaison des temps d'apprentissage et de marche montre des stratégies différentes entre les deux groupes qui ont simulé et G5. Les sujets de G1 et G2 ont besoin d'une période d'initialisation de la marche mentale et se déplacent plus vite mentalement que ceux de G5 pour lesquels on n'observe pas d'initialisation et qui parviennent à garder une excellente proportionnalité entre temps d'apprentissage et temps de marche.

IV -2.9.5.Le sujet traite-t-il séparément les angles et les distances ?

Le mode de calcul adopté pour les erreurs de corde et d'angle, exprimant la production du sujet en pourcentage des valeurs du modèle à parcourir, permet de comparer des conditions expérimentales ou le comportement d'un même sujet sur différentes portions de trajet. Il permet également de comparer les erreurs de corde aux erreurs d'angle correspondantes sur la portion de trajet considérée.

Les résultats présentés dans la section "Espace des erreurs" (page 118) montrent clairement que les erreurs de corde ne sont pas corrélées aux erreurs d'angle même si des tendances sont enregistrées en faveur d'une part d'une meilleure corrélation au début du trajet et, d'autre part d'une meilleure corrélation erreur de corde/erreur d'angle pour les groupes G1, G2 et G3 par rapport à G4 et G5. Ces résultats pourraient être dus à un effet cumulatif de l'erreur qui augmenterait au fur et à mesure de la progression du sujet. Cependant l'évolution temporelle de chacune de ces erreurs n'est pas linéaire et ne présente pas systématiquement un caractère positif comme le montrent les résultats des sections "Erreur de corde (%)" (page 115) et "Erreur d'angle (%)" (page 117).

Même si une tendance se dessine en faveur d'une meilleure corrélation erreur de corde/erreur d'angle pour G1, G2 et G3, il semble tout à fait prématuré de postuler l'existence de voies de traitement a-spécifiques des distances et des angles. Nos résultats semblent plutôt renforcer l'idée d'un codage différencié des distances et des angles déjà mentionnée pour des tâches de navigation chez l'homme (Berthoz et al., 1999; Glasauer et al., 2000) et chez l'animal (Cheng, 1998; Durier et al., 1999) mais aussi pour des tâches de pointage manuel par exemple (Boucher, Velay, & Paillard, 1992; Coello & Orliaguet, 1994).

IV -2.9.6.Quel est l'effet de la géométrie ...

Une part importante de nos hypothèses et de nos calculs ont été proposés dans le but d'objectiver quantitativement l'effet de la forme du modèle sur la reproduction marchée de ce modèle. Les tâches de complétion d'hexagone que nous avons proposées permettent de caractériser le comportement locomoteur des sujets face à un modèle parfaitement régulier (RH). Mais en plaçant les sujets dans les conditions PA et PD, nous sommes en mesure de donner une estimation de l'incidence d'une modification des distances (PA) ou d'une modification des angles (PD). La question qui est posée ici est celle de la capacité des sujets à tenir compte du caractère spatialement répétitif de certains sous ensembles du modèle.

L'étude visuelle de certaines trajectoires ne garantit pas de deviner *a posteriori* le modèle qui a été proposé aux sujets. Il est nécessaire de recourir à des indices chiffrés sur la forme du trajet, les erreurs de corde et d'angle et les durées des déplacements (apprentissage et marche).

IV -2.9.6.1. ... du point de vue du respect de la forme du modèle ?

Bien que les valeurs du coefficient de corrélation de la régression bi-dimensionnelle ne montrent pas de différences en fonction de la forme du modèle, les résultats de *Rmse* montrent un effet de la condition d'apprentissage qui renforce l'idée d'un niveau de performance élevé lorsque les sujets apprennent la tâche en simulant le trajet. Ces résultats suggèrent également l'efficacité des méthodes de simulation dans le cas d'une forme parfaitement régulière. *A contrario*, l'absence de régularité (de distance pour PA et d'angle pour PD) diminue l'apport de ces méthodes de simulation. La décomposition de l'ajustement nous fournit de précieuses indications quant à une utilisation des propriétés géométriques des modèles pour la reproduction. En effet, l'orientation du centre de gravité des coins imaginés par rapport à ceux du modèle montre une tendance marquée des sujets à déplacer leur trajet sur l'axe formé par les points de plus grand éloignement du modèle. Cela se traduit par un déplacement vers le coin 3 pour RH et PD (voir le paragraphe "Translation du centre de gravité des coins imaginés" - page 111). L'étude des valeurs de rotation des paramètres de l'ajustement permet de retrouver une prise en compte des caractéristiques géométriques du modèle. En effet, les conditions d'apprentissage ont une incidence sur la reproduction des trajets dans le cas des formes qui ne modifient pas les longueurs des côtés (RH et PD). Ce n'est plus le cas pour PA. Les conditions d'apprentissage ne se différencient pas, ce qui montre qu'une modification des longueurs des côtés du modèle conduit à des ensembles de coins imaginés ayant subi des

rotations importantes et variées. Les sujets ne sont plus en mesure pour ce modèle de reconstruire la cohérence de la forme qu'ils ont observé.

IV -2.9.6.2.... pour la reproduction de la corde et des angles et pour la précision par rapport à chaque cible ?

Les cordes totales sont surestimées de 3 à 13 % selon les groupes mais ces surestimations de la totalité du trajet ne sont pas affectées par la géométrie des modèles. Par contre, on enregistre des effets locaux de la géométrie sur certaines portions du trajet. Pour les 2 modèles dont les longueurs des côtés sont identiques (RH et PD), on constate une surestimation des côtés qui sont parallèles au grand axe du modèle (Départ - Coin 3). Ce phénomène s'accompagne d'une moindre surestimation du milieu du parcours (Côtés 3 et 4) par rapport aux autres parties. Cela semble indiquer que les sujets mettent en œuvre une stratégie de compensation qui tient compte du lieu où ils se trouvent et de la forme du modèle. Cette stratégie est différente d'une simple reproduction des déplacements en translation comme nous l'avons observé pour une forme parfaitement régulière (RH). Ces résultats montrent également que la mise en place de cette stratégie est possible lorsque les sujets perçoivent le paramètre répété d'une portion du trajet à la suivante (la distance pour RH et PD) puisque pour PA les cordes différentes selon le côté considéré indiquent une difficulté à percevoir la régularité des angles. Il semble donc que la conservation des distances (RH et PD) contribue à une meilleure reproduction des cordes des segments d'un trajet locomoteur préalablement observé que la conservation des angles (PA).

Les résultats obtenus pour les erreurs d'angle montrent clairement que les changements de direction ne sont pas de même nature selon la forme du modèle. L'erreur d'angle totale indique que la modification des longueurs des côtés du modèle (PA) a des répercussions plus importantes que la modification des angles (PD). Elle contribue à minimiser la surestimation des angles.

Les résultats montrent également que les erreurs d'angle lors de la marche dépendent aussi du coin considéré. Cela signifie qu'à valeurs du modèle équivalentes, l'erreur d'angle n'est pas toujours égale. On peut retenir que la préservation des angles (RH et PA) a pour effet principal une division du trajet en trois parties. Dans la première partie, les angles sont fortement sous estimés (Coins 1 et 2). Dans la seconde partie, l'angle (Coin 3) est fortement surestimé. Enfin, dans la troisième partie (Coins 4 et 5), les angles reproduits sont proches des valeurs requises par le modèle (voir le paragraphe "Erreur d'angle par coin (%)" - page 117).

Ces résultats suggèrent l'existence d'une stratégie de rotation de l'espace imaginé qui accompagnerait le mouvement des sujets. Elle impliquerait, dans une perspective d'éloignement puis de rapprochement par rapport au point de départ, que les sujets visualisent le demi espace auquel ils font face lors du trajet aller avant de se retourner et de faire face à l'autre demi espace. Ce changement de point de vue (Amorim, 1997) serait accompagné d'une surestimation de l'angle lors de la transition entre l'aller et le retour. Le cas de PD reste plus ambigu et suggère l'adoption d'un autre type de stratégie où les informations de position du sujet dans l'espace joueraient un rôle plus important que pour les autres formes.

Enfin, la forme du modèle n'est pas un facteur qui vient affecter la valeur des corrélations entre erreur de corde et erreur d'angle.

IV -2.9.6.3.... du point de vue temporel ?

Alors que la forme du modèle ne modifie pas la durée totale de l'apprentissage, elle devient un facteur prédominant lors de la marche. Là encore PA se distingue de RH et PD. Il faut plus de temps aux sujets pour reproduire le modèle lorsque les distances sont modifiées (PA) que lorsque les angles sont modifiés (PD). Ce phénomène s'accompagne d'une meilleure corrélation entre temps mental et temps de marche pour PD et RH ce qui renforce l'idée d'une meilleure prise en compte par le système nerveux central de la symétrie axiale du modèle plutôt que de la reproduction des angles.

IV -2.10.Résumé et conclusion

En résumé, nous avons comparé la locomotion en absence de vision sur un trajet hexagonal parfaitement régulier (RH) ou ayant subi des déformations dues à des modifications spécifiques des longueurs des côtés (PD) ou des angles entre côtés successifs (PA). Nous avons également comparé l'incidence d'une simulation préalable du parcours. Nous avons analysé les résultats en regroupant nos calculs en trois catégories : respect de la forme du modèle initial, reproduction des paramètres géométriques (corde, angle, éloignement coins imaginés/coins réels) et caractéristiques temporelles.

Notre but était de répondre à des questions théoriques concernant i) le rôle de la simulation par rapport au repos ou à la marche réelle ; ii) le traitement univoque ou différencié des rotations et des translations par le système nerveux central lors de la marche ; iii) le rôle de la géométrie du modèle que le sujet doit reproduire en marchant.

Nos résultats indiquent que la simulation préalable de la locomotion (avec ou sans mouvement) permet de rapprocher la forme du trajet de celle du modèle et d'améliorer la performance dans des proportions identiques à celles obtenues par un apprentissage effectué en marchant. De plus, les performances obtenues ainsi sont meilleures que celles obtenues par les sujets au repos pendant la phase d'apprentissage, ce qui montre un réel effet de la simulation sur la qualité morphologique générale du trajet reproduit.

Cependant, l'effet positif de la simulation concerne principalement la forme régulière ce qui suggère un traitement global des formes au cours duquel toutes les propriétés géométriques des "leurres cognitifs" introduits par l'expérimentateur n'ont pas été intégrées.

Ce phénomène s'accompagne de variations dans les durées de marche. Les deux principaux facteurs qui conduisent à une augmentation de la durée de marche sont d'une part un apprentissage de la tâche effectué sans se mouvoir (G1) et, d'autre part, une forme du modèle qui préserve les angles sans préserver les distances (PA).

Nous interprétons ce résultat comme la manifestation de la tendance du système nerveux central à privilégier les formes symétriques et régulières lors de la formation de la représentation de l'espace ou à tenter de reconstruire une symétrie des formes mémorisées. En effet, pour les hexagones RH et PD le grand axe coïncidait avec un axe de symétrie sur lequel se plaçait le sujet lors de l'observation. Par contre, dans le cas de l'hexagone PA la position d'observation ne se trouvait pas sur l'axe de symétrie. Cette position d'observation "décalée" pourrait être à l'origine des difficultés de reproduction de ce trajet particulier.

Nous suggérons que cette représentation soit considérée comme une entité dynamique et multi-sensorielle car nos résultats semblent indiquer que le passage de l'image visuelle du parcours à l'image motrice de la locomotion permettant de l'effectuer est grandement facilité par une activité motrice préalable à la réalisation proprement dite.

L'apport de l'activité préalable de simulation du mouvement et les meilleures performances enregistrées pour la forme régulière pourraient nous conduire à une interprétation privilégiant une mise à jour, dans un référentiel egocentré, des informations de position. En effet, nous savons qu'une très faible quantité d'information est nécessaire pour résoudre le problème de la reproduction du trajet. Par exemple, dans le cas de l'hexagone RH, le sujet a besoin de coder la longueur du côté, la valeur de la rotation et le nombre de côtés. La connaissance de ces trois informations suffirait à le ramener à son point de départ après être passé à chaque coin. Compte tenu du caractère régulier de cet hexagone, l'hypothèse d'une mise à jour des informations de position aurait du conduire à des erreurs d'angle et des erreurs de corde parfaitement identiques pour tous les coins et côtés. Nous n'avons pas observé de tels résultats. En particulier, nous avons montré que la reproduction d'un angle dépend davantage de la position du coin considéré sur le parcours que de la valeur angulaire à reproduire. C'est la raison pour laquelle nous penchons davantage pour une interprétation basée sur la mise à jour des informations de position dans un "référentiel mixte". Ce référentiel serait alternativement égo et exocentré. Il pourrait rester égocentré lorsque le changement de direction est de faible amplitude et que la scène visuelle mémorisée au départ est compatible avec la direction imaginée du déplacement. Par contre, lorsque le changement de direction est de grande amplitude, la mise à jour des informations de position nécessiterait également une rotation importante de la scène visuelle imaginée (180° dans notre expérience) qui se déroulerait dans un référentiel exocentré.

V - Does mental simulation of following a path improve navigation performance without vision?

Article sous presse dans Cognitive Brain Research

Stéphane Vieilledent [a, c *], Stephen M. Kosslyn [b], Alain Berthoz [c] and Marie Dominique Giraudo [d]

[a] Laboratoire Mouvement Action et Performance - Insep
11 avenue du Tremblay, 75012 Paris, France
email: vieilled@micronet.fr
Tel: 33 1 41 74 44 70
Fax: 33 1 41 74 45 35

[b] Harvard University
830 William James Hall, 33 Kirkland Street
Cambridge, MA 02138, USA

[c] LPPA - Collège de France
11, place Marcelin Berthelot
75005 Paris, France

[d] Université de la Méditerranée - Faculté des Sciences du Sport
163, avenue de Luminy, CP 910
13288 Marseille, France

Corresponding author:
Stéphane Vieilledent
Laboratoire Mouvement Action et Performance - Insep
11 avenue du Tremblay, 75012 Paris, France
email: vieilled@micronet.fr
Tel: 33 1 41 74 44 70
Fax: 33 1 41 74 45 35

Number of figures = 6
Number of tables = 1

Acknowledgment : This research has been carried out with the helpful support of the French Federation for Mountaineering and Climbing, Albert Gaudin and Stéphane Dalbera from Biometrics France Ltd, Gilles Dietrich and Yves Kerlirzin.

Abstract

We recorded the paths of subjects who walked along a memorized hexagonal route without vision, and studied the impact of previous mental simulation of this activity on how well the path could be reproduced from memory. We compared two kinds of mental simulation to actual physical practice, rest, or simple memorization of the path. The results indicated that mental simulation led to better reproduction of the global shape of a path than rest, and in fact mental simulation was as effective as actual physical practice. However, this result occurred only for "simple shapes" when the lengths of the sides of the path were kept constant. Nevertheless, this level of performance was not reached when the complexity of the shape was increased by altering the lengths of sides, even when keeping constant the angles between consecutive sides. This finding indicates that the internal representation of space depends on geometric properties of the environment in which the subjects operate. Mental simulation appears to affect both a map-like and route-like representation of the environment.

Theme: Neural basis of behavior
Topic: Cognition
Keywords: Locomotion - Navigation - Geometry - Mental imagery

V -1. Introduction

Mental practice occurs when one imagines performing a motor skill without making overt movements. Such practice has been found to enhance actual performance (Feltz & Landers, 1983; Jones et al., 1997 for reviews). A wide variety of motor tasks, ranging from increasing muscular strength (Yue et al., 1992) to improving accuracy in tasks such as basketball throwing (Savoy & Beitel, 1996) can benefit from mental practice. In general mental practice is more effective than no practice, but not as effective as physical practice. The mechanisms underlying mental practice are of interest both from an applied perspective (such as in motor learning or rehabilitation) and from a theoretical perspective; indeed, the mere fact that mental practice is effective has implications for how the information used in actual performance is stored and used (Jeannerod, 1994 for a review; Melvill Jones & Berthoz, 1985). The fact that mental practice affects actual performance is consistent with well-documented effects of top-down processing. For example, mental effort can contribute to adaptive modification of vestibulo-ocular reflexes during prism wearing; these modifications may be associated with perceptual changes, suggesting that top-down processing can affect even such low-level events (Melvill Jones, Berthoz, & Segal, 1984; Melvill Jones et al., 1985).

Remarkably little is known about whether mental practice can effectively enhance performance during navigation. In this case, subjects are mentally simulating what they would do in the corresponding physical situation; thus, "mental simulation" is the use of imagery—motor and visual—to rehearse or anticipate navigating along a particular path. Mental simulation is a reasonably direct way to manipulate the internal representation and thereby alter its characteristics. This is a particularly interesting domain because it affords an opportunity to study the mechanisms underlying both mental practice and navigation itself.

The present study thus has two overarching goals. First, we wanted to demonstrate that mental simulation can affect the accuracy of walking along a path on the basis of information stored in memory. It is likely that the properties of the internal representation of space can be accessed and even modified by mental imagery. Visual mental images share common properties with the actual objects that they represent; indeed, about two-thirds of the same brain areas are activated during visual imagery and visual perception (Kosslyn, Thompson, & Alpert, 1997). Moreover, Decety (1989) has shown that the timing of mentally represented actions is very close to the timing of the corresponding actual movements. However, this

process, even if rooted in common neural substrates between imagined and executed actions (Roland et al., 1980), should be capable of being modulated. Indeed, interactions may occur between visual and motor images (Wexler et al., 1998), and many studies have shown that mechanical or biomechanical constraints on movement are taken into account when we form mental images. When the movement is very highly constrained or even biomechanically impossible, the timing of the imagined movement deviates from the timing of the actual movement--as if the default tendency of the central nervous system is to simulate natural movements (Parsons, 1994; Parsons, 1987). In the navigation domain, one might expect that the use of mental images could improve the ability to walk down a path (Vieilledent et al., 1996).

It remains unclear whether mental simulation occurs only in the head, or is more effective when one actually makes movements—even "abbreviated movements" that arise from executing "movement programs". During imagined movements, researchers have shown that low amplitude muscular patterns appear in the muscles along with small segmental movements. The seminal studies of Jacobson (1932) documented that mental training is accompanied by electromyographic activity (EMG) in a muscle at rest if this muscle is typically involved in the corresponding actual movement. Wehner et al. (1984) found a spectral distribution of the EMG signal in the biceps brachii that was very similar to the signal recorded during the actual movement. This peripheral EMG activity would be sufficient to send kinesthetic information to the CNS, which could evoke a motor image of the actual movement. In our study, “abbreviated movements” do not specifically refer to the EMG activity but rather, at a more macroscopic level, to the small movements accompanying mental simulation. Thus, in the present study we explicitly compare mental simulation both with and without "abbreviated movements" to other forms of learning a path.

Our second general goal was to use mental simulation to gain insight into how pathways are represented in memory. During navigation, sensory inputs play an important role in spatial perception, learning, and memory (Loomis et al., 1993). In particular, vision allows animals to guide their locomotion along particular paths and provides information about the general layout of the surroundings. Although locomotion usually seems effortless, the process is remarkably complex — particularly when direct perception of the surroundings is not available. In this case, one is following a remembered path and must not only encode different pieces of information about the surrounding space as well as the state of the displaced body and its actual position in space, but also must compare this information to representations of the potential paths to a goal (Able, 1989; Gallistel, 1990).

Information in memory may guide navigation in two major ways. On the one hand, situations in which subjects find their way in the absence of external cues may rely on the computation of their position in space with respect to their starting point (Berthoz et al., 1995; Marlinsky, 1999b; Marlinsky, 1999a). In this step-by-step process of "path integration", vestibular linear and angular acceleration signals are integrated to provide an estimate of the current position based on an estimate of the previous one. This mechanism, clearly involved in navigation without vision, relies on measures of the variations of one's own internal state and of the configuration of the sensory receptors (Etienne et al., 1999; Mittelstaedt et al., 1982; Israël et al., 1997; Mittelstaedt et al., 1991).

On the other hand, locomotion without external cues may also require the use of "mental models," internal representations of the geometry of a space, to prevent subjects from experiencing the sensation of being lost or even momentary disoriented. These mental models rely on one's "point of view" (Etienne et al., 1996); in this case, salient points of the environment are identified and used as landmarks in route or survey representations of the environment (Klatzky et al., 1990). We hypothesize that such internal representations can be augmented not only by direct observation, but also by "mental simulation" — by imagining that one is moving through the environment. Indeed, during navigation subjects may use complex combinations of translation and rotation displacements to fit the shape of the desired path; navigation may be guided by an implicit or explicit geometric internal model that one tries to reproduce. In order to do so, subjects would build up a representation that in turn guides their navigation behavior in the environment.

Recent results (Takei et al., 1997; Berthoz et al., 1999) document a dissociation between the coding of distance and direction during blind locomotion. These findings suggest that a polar coding of space is used to guide navigation, at least in some circumstances. One may ask how this type of coding is compatible with a global map-like representation of the 2D trajectory. It is possible that both a route-like and a map-like representation of the path are used in navigation (Mellet et al., 2000). If a route representation is present, then mental practice could have separable effects on representations of distance versus angles between segments of a path; the route representation would preserve the distinction between these two sorts of information. In contrast, if a map-like representation is used, then the overall shape of a path might be affected by mental simulation, not distances and angles separately**.** It is also possible that both the global shape of a path and specific aspects of routes are simultaneously represented, as suggested by the idea that two distinct types of representations are present.

To study the characteristics of the information stored in memory that guides locomotion, we study navigation without visual feedback. If people see the path to be followed or see the landmarks to be reached before beginning a navigation task without vision, a stored representation of the path can subsequently be used to guide navigation. But the representation of space may be subject to distortions that do not preserve the metric and topologic relationships of its different parts (Giraudo et al., 1994). This notion is in accordance with the "cognitive collage" metaphor, which highlights the breakdown of space into several sub-spaces, each with their own geometrical properties (Tversky, 1993).

The present study is a systematic investigation of the contribution of mental simulation to the acquisition of spatial knowledge. In particular, we address the following questions: 1) Is mental simulation more efficient than rest in helping one to reproduce a path during navigation without vision? 2) Is mental simulation poorer than learning a path via actual movement? 3) Is memorizing the appearance of a path and explicitly trying to reproduce it better than actual movement? 4) Is mental simulation more effective for promoting learning than simply reproducing a memorized path? 5) Finally, what is the role played by the geometry of the path to be followed? We investigate the influence of modifying the length of particular segments versus the angles between adjacent segments. By varying paths in these ways, we sought to discover whether mental simulation or the other learning techniques favor one sort of information over the other—or whether neither sort per se is stored more effectively, but instead a "global shape" configuration is stored.

V -2. Material and methods

V -2.1.Subjects

Thirty two male subjects ages 22 to 55 years (mean = 35.8, SD = 10.1) volunteered to participate in this experiment. They were naive with respect to the purposes of the study and had not previously participated in experiments on locomotor path reproduction or mental imagery. None of them reported sensory or motor problems. Each subject was randomly assigned to one of the five experimental groups. Data were excluded from two subjects whose performance was abnormal; that is, these two subjects had very long walking durations, and often walked very far outside the calibrated space. Data from two other subjects were not used because of problems during computerized acquisition. In the end, we analyzed the data from 28 subjects, distributed in the different groups as follows: G1, 5 subjects; G2, 6 subjects; G3, 5 subjects; G4, 6 subjects and G5, 6 subjects.

V -2.2.Task and procedure

We designed three different six-sided paths with wooden beams 7 cm wide and 3.5 cm high (see Figure V-1). All paths were 12.15 m long, but differently shaped. The first one was a perfectly regular hexagon; each side was 2.03 m long, and the angle between every pair of successive sides was 60°. This regular hexagon will be referred to as RH. The other two paths were modified versions of RH. One of them preserved the angles (PA), but not the lengths of the sides; the angle between two successive sides was always 60°, but their length alternated between 1.55 m and 2.5 m. Finally, the third path preserved the distances (PD) of each side (2.03 cm), but not the angles (48.5° and 83°).

Insert Figure V-1 and Figure V-2 about here

All subjects began by observing the path, and then learned it according to a specific method (as will be described shortly), and then walked with the aim of reproducing the shape of the path (see Figure V-2). In order to prevent them from perceiving any information about their position in the environment, all subjects were equipped with black goggles and a personal stereo that delivered white noise while they traced the path. All subjects performed

eight trials for each path, with the paths being presented in a counterbalanced order within each group.

Observation phase

Subjects stood in an upright posture on a 0.8 * 0.8 m square platform located at the departure point. They saw the path for the first time and received the instructions about the task. Remaining on the platform, they were given two minutes to observe the path and memorize the positions of the departure point, the corners, and the arrival point, knowing that they would have to orient themselves and walk to each successive corner until they reached the arrival point.

Learning phase

This phase always followed the observation phase and was different for each of the five groups. However it lasted five minutes in all cases.

Group 1, Simulation without movement: Seated on a chair located at the departure point and facing the first corner, subjects were asked to mentally simulate walking along the path. They were to begin their mental simulation at the departure point, and end at the arrival point. The subjects were told to take a direct path between each pair of successive corners. The subjects were told to indicate when they began the mental simulation, each time they turned a corner during this simulation, and when they reached the arrival point; they made these responses by pressing a key on a remote control that they held with both hands in front of their chest. This device was synchronized with a motion capture device (see below). The same timing procedure was also used by the subjects in Groups 2, 3 and 5. The orientation at the arrival point was the same as the orientation of the last side of the path (corner 5 - arrival point).

Group 2, Simulation with movement: As they did during the observation phase, subjects in this group stood in an upright posture and were oriented toward the first corner. They were asked to step in place, taking a "virtual walk", and to orient themselves toward the successive corners. They were to produce rotations around their own longitudinal axis but no translation; they moved in place. At the end of each trial the subjects kept their goggles and headphones on, and were passively turned by an experimenter in randomized sequences until they reached the initial orientation. Before beginning the next trial, the subjects were allowed to glance briefly at the first corner and accurately adjust their orientation.

Group 3, Constrained movement: Subjects in this group learned the paths by actually walking on the wooden beams, from the departure to the arrival point with eyes opened.

Group 4, Rest: Subjects in this group sat on a chair located at the departure point, and were oriented toward the first corner. Like the other subjects, they wore black goggles and a personal stereo delivering white noise, but unlike the others they did not simulate anything. The subjects of this group rested 5 minutes. This duration corresponds to the average overall duration of the learning phase of the four other groups.

Group 5, Memorized reproduction: For this group, the beams were removed from the ground and the subjects were told to reproduce the path by walking on a flat floor, which they did just after the observation phase. After each trial, an experimenter passively led the subjects to the departure position, following random paths (to minimize the cues that would allow the subjects to receive feedback on their performance or to infer their position in the environment). Just before the following trial, subjects were allowed to take off the goggles and adjust their position and orientation.

Walking phase

We were primarily interested in the effects of the different learning procedures on how well subjects subsequently reproduced the path from memory. We assessed their memory by asking them to walk along the path on the flat floor. This phase always took place after the observation and learning phases. Subjects performed eight actual walking trials with goggles and white noise on, and indicated their starting, direction changes, and arrival by mean of the remote control. In fact, these trials corresponded exactly to the learning trials of the Group 5.

By observing the shape of the walked trajectories for the three types of paths, RH, PA and PD, we sought to discover what sort of information was practiced during the different learning conditions. In particular we wanted to know what geometrical variations of the shapes the subjects could process during the learning phase. Our hypothesis was that if subjects could take into account the variations in distances, the performance for PA and RH should be equivalent; and if subjects learned the variations of angles, the performance for PD and RH should be equivalent.

In summary, our procedure had three distinct phases (observation, learning, and walking), three paths (RH, PA and PD), and five learning conditions (Groups 1 - 5). We took eight measurements for each subject and path during both learning and blindfolded walking phases. Thus, each subject performed 2 (phases) * 3 (paths) * 8 (measurements) = 48 trials.

V -2.3.Data acquisition and analysis

We calibrated a 10 (width) * 10 (length) * 2.5 (high) m^3 volume with a seven-camera, infrared optoelectronic motion capture device (Vicon 370, Oxford Metrics Ltd). This system interfaced with an analog-to-digital converter, and allowed us both to record the 3D position of a passive lumino reflexive marker and localize analog signals sent by the subject by means of a remote control. The marker was located on the center of a helmet worn by the subject. The marker was precisely aligned with the body longitudinal axis and provided the position of the subject. In the present study, we focused on the horizontal components of this position (xy plane). The sample rate was 60 frames per second and the mean spatial error was 0.005 ± 0.001 m. Raw position data were interpolated with a polynomial algorithm. Our method consisted of filling any gaps in data collection if the amount of missing data was smaller than 10 consecutive samples (160 msec.). The interpolation procedure was applied with Vicon Workstation software (version 3.7), which de facto relied on a polynomial algorithm. Those files with more than 10 consecutive remaining missing samples, however, were excluded from further analyses. Interpolated data were then filtered with a Butterworth low pass, fourth-order, recursive filter, using a 5 Hz cutoff frequency (Winter, Sidwall, & Hobson, 1974) in order to remove all high frequency components from the position signals that could be generated independently of the movement of the subjects themselves.

To compare the correct shape of the path with the shape of the trajectories the subjects actually took, we considered the seven horizontal position samples where subjects pressed the remote control during each trial of the walking phase. These positions corresponded to the imagined positions of the departure, corners, and arrival points; linked together, these positions specified the shape of the imagined path. We performed a two-dimensional regression analysis that computed a correlation coefficient (*r*) between the set of actual vertices and the set of imagined corresponding positions. Moreover, we were able to compute an indicator of the mean discrepancy (root mean square error, RMSE) between the two shapes being compared. The RMSE provided an estimate of the distance between the correct positions of the points and the equivalent points of the subjects' trajectories. This measure is based on three Euclidian transformations : i) a translation to fit the centers of gravity of the two sets of points; ii) a rotation; and, iii) a scale factor to minimize the mean distance between the points according to the least squares method. This bi-dimensional regression calculation is directly in line with the one used by Kosslyn et al. (1974) and has been extensively described (Giraudo et al., 1994). The basic principle is to compare the discrepancy between two spatial

configurations of n homologous points distributed in the 2D space (Tobler, 1977; Tobler, 1976; Tobler, 1978). For this, we define a first configuration, named A, with the set of coordinates (Xi, Yi) of the actual corners of the hexagon and a second one, named I, with the set of coordinates of the imagined corners (Ui, Vi). The discrepancy between the two configurations (actual A and imagined I) can be represented by the vector AI, specifically the vector (Xi, Yi), (Ui, Vi). The problem lies in determining the best fit of the actual configuration A on the imagined configuration I. Here, as in one-dimensional spaces, the best fitting function minimizes the difference between the two configurations. To achieve this goal, we determine f, a function of A, that adjusts A to I as close as possible. The remaining overall discrepancy between the A and I configurations is the mean distance between the points of A and the corresponding points of I, which is a measure of global error and is quantified by mean of the root mean square error (RMSE). Thus, there is no linear relationship between the mean discrepancy for the overall configuration and the local discrepancy for each point, even if these two measures are related one to each other in the sense that an increase in the mean RMSE may be induced by an increase in local discrepancies.

Repeated measurements analysis of variance (ANOVA) were performed to compare the geometric properties of the walked paths between groups (5), shapes of the model (3), and trials (8).

V -3. Results

We focused on the paths reproduced during the walking phase. These paths are shapes with six sides, for which lengths and orientations can vary between groups (Figure V-3). Subjects tended to reproduce well the actual path when initially walking along the first side, but began to deviate when they reoriented their bodies and walked along the following sides. This behavior may indicate discrepancies between the actual shape of the path and the mental model constructed by the subjects.

---
insert Figure V-3 about here

To compute and compare *means of correlation coefficients* Fisher's z-transformation was used to improve normality. Coefficients are given after transformation back to the original scale. The values of the pooled correlation coefficients *r* for all stimulus paths are displayed in Figure V-4A. They are 0.86 ± 0.20 for RH, 0.90 ± 0.15 for PA and 0.86 ± 0.16 for PD. These results show that the reproduced shape remains very close to the shape of the actual path for all groups and paths. Indeed, there was no difference between groups ($F(4,20) = .48$; $p>.05$) or paths ($F(2,40) = 1.16$; $p>.05$), and the interaction of these two factors failed even to approach significance ($F(8,40) = .87$; $p>.05$). Moreover, the correlation coefficient remained unchanged from the first to the last trial ($F(7,140) = .64$, $p>.05$).

However, considering all the trajectories produced during the walking phase, we note that the RMSE values varied from 8.4 ± 1.4 cm for G3 to 10.3 ± 1.9 cm for G5 (see Figure V-4B). These values were significantly different ($F(4, 20) = 2.96$, $p <.05$), but there were no significant effects of the shape of the path reproduced by the subjects ($F(2,40) = 1.64$, $p >.05$) and no significant effect of the trial ($F(7,140) = .64$, $p >.05$). There was, however, an interaction between shape and trial ($F(14,280) = 1.75$, $p <.05$) mainly arising from an interaction between PA and RH ($F(7,140) = 2.82$, $p <.05$). This finding seemed to reflect an increasing tendency of the RMSE for RH accompanied by a decreasing for PA from trial 1 to trial 8.

When comparing the groups, we found that the RMSE did not differ between the two first groups, G1 and G2, when pooling the shapes together ($F(1,20) = .19$, $p>.05$) or considering them separately ($F(1,21) = .00$, $p>.05$ for RH ; $F(1,23) = .65$, $p>.05$ for PD and

F(1,22) = .11, p>.05 for PA). Therefore we pooled data from these two groups in the subsequent analysis. Planned comparisons also revealed that performance improved with simulation (G1-G2) during the learning phase compared to rest (G4) for RH (F(1,21) = 4.46, p <.05) and PD (F(1,23) = 4.41, p <.05). However, this result did not occur with the PA path (F(1,22) = .79, p>.05). Moreover, G1-G2 and G3 had comparable performance (with F(1,21) = .31, p>.05 for RH ; F(1,23) = .16, p>.05 for PD and F(1,22) = 1.27, p>.05 for PA). In addition, the same comparisons performed between G1-G2 and G5 revealed that participants in G1-G2 were more accurate than those in G5 for RH (F(1,21) = 6.50, p<.05) and PD (F(1,23) = 9.26, p<.001) but we did not observe such a difference for PA (F(1,22) = .41, p>.05). Finally, G4 and G5 performed comparably (F(1,20) = .19, p>.05), and did so for each shape with F(1,21) = .40, p>.05, F(1,23) = 2.71, p>.05 and F(1,22) = .06, p>.05 respectively for RH, PD and PA.

Furthermore, we found a significant difference (F(1, 20) = 10.17, p <.01) between the values from the three first groups (G1-G3) versus those from the two last groups (G4 and G5). This result indicates first that subjects who simulated locomotion during the learning phase (G1 and G2) had better shape reproduction performance than subjects who rested (G4), and second that their performance is equivalent to that of subjects who learned by actually walking on the beams. However, planned comparisons showed that this segmentation of the groups in two distinct categories (G1-G3 versus G4-G5) is only evident when the shape to be reproduced did not vary the lengths of the sides (see Table V-1): we found significant differences for RH (F(1, 21) = 11.21, p <.01) and PD (F(1,23) = 6.82 p <.05) but not for PA (F(1,22) = .92, p >.05).

---

insert Figure V-4 and Table V-1 about here

We further analyzed the characteristics of each type of transformation in order to probe more deeply into the reasons why the subjects in G1, G2 and G3 more accurately reproduced the path than subjects in G4 and G5.

The analysis of the scale factor values (Figure V-5 C) revealed that the observed differences between G1-G3 and G4-G5 for RMSE did not originate from any positive or negative zooming effect specific to the learning condition (F(4,20) = .66 p >.05) or from the shape to be reproduced (F(2,40) = 1.56 p >.05). However, the analysis of the translation

values (Figure V-5 A) and the rotation (Figure V-5 B) values did provide two main insights into the causes of the observed difference. First, the distance between the center of gravity of the actual corners and the center of gravity of the imagined corners depends on the learning condition ($F(4,20) = 6.47$ $p < .01$), with systematically higher values for G5 than for the other groups. This result was obtained for RH ($F(1, 21) = 14.15$, $p < .001$) and PD ($F(1,23) = 28.22$ $p < .001$), but not for PA ($F(1,22) = .92$ $p > .05$). Because the scale factor did not significantly differ from one group to another, the present result suggests that the subjects in G5 emphasized detours outside the actual shapes, at least for some parts of the path (Figure V-6). This inference is supported by the direction of the displacement of the center of gravity of the imagined corners with respect the actual ones. Considering the x axis as being the reference direction and the counterclockwise direction as being positive, the mean direction is 90,97° ± 42.87° for RH, 96.10° ± 41.96° for PD and 50.95° ± 63.44° for PA. This means, on the one hand, that the center of gravity tends to move along the y axis for RH and PD -- i.e., the main axis of these two shapes -- and, on the other hand, that for PA it tends to move along an intermediate direction between the two main axis of this shape.

Second, the rotation applied to minimize the distances between actual and imagined corners significantly varied according to the learning condition. The amount of rotation was higher for G4 than for each of the other groups ($p < .001$). This significant difference in the angle of rotation means that subjects in G4 tended to change the main orientation of the imagined path without changing significantly its size and overall position. In other words, the comparable results for the RMSE from G1-G3 were obtained with quantitatively equivalent values for each Euclidian transformation. The observed differences for RMSE between G1-G3 and G4-G5 are due to a discrepancy in at least one of these transformations (translation for G5 and rotation for G4).

---

insert Figure V-5 and Figure V-6about here

V -4. Discussion

In this experiment we manipulated the internal representation of a path by asking subjects to engage in different learning procedures. Let us consider each of the specific questions we asked.

1) Is mental simulation more efficient than rest in helping one to reproduce a path during navigation without vision? The answer is clearly positive, as shown by high values of the correlation coefficient accompanied by low values of RMSE for the first two groups of subjects (G1 and G2). Carrying out a mental simulation allowed subjects to produce a shape closer to the actual path than the shape produced by subjects who rested.

2) Is mental simulation poorer than learning a path via actual movement? The fact that the correlation coefficients are very high and that the RMSE does not significantly differ for the first three groups is evidence that subjects learned the path via mental simulation as well as in the other two conditions. This was not the case for the group of subjects who rested during the learning phase.

3) Is memorizing the appearance of a path and explicitly trying to reproduce it better than actual movement? The comparison of the two groups that produced a walking pattern during the learning phase mainly shows that the mechanical constraints provided by the beams led subjects in G3 to reduce the distances between corners they imagined and the actual corners. Learning may have been more effective when the walk is constrained (G3) than when it is not, but instead is based on the memorized shape of the path to be followed. For the subjects of G5, both the absence of motor constraints generated by the beams and the absence of visual feedback may have contributed to their relatively poor performance.

4) Is mental simulation more effective than reproducing a memorized path? The important role played by mental simulation was confirmed by the comparison of the effects of this learning method to those obtained with memorized reproduction, and our main result showed that the RMSE was lower for the two simulation groups (G1 and G2) than for G5.

We found that mental simulation (with or without movement) led subjects to produce paths that were very similar to the actual paths, on one hand, and to the paths produced by subjects who actually walked during the learning phase in a constrained situation (G3), on the other hand. The fact that two mental simulation learning methods were more efficient than rest or memorized reproduction underscores the importance of imagining locomotion for navigation (Ghaem et al., 1997; Mellet et al., 1995). These two learning methods provided the subjects with a more-or-less distorted internal representation that, nevertheless, specified key

aspects of the path to be followed. On the other hand, rest and memorized reproduction did not improved the representation of the shape of the path.

The key mechanisms used in navigation introduce kinesthetic information into organized temporal sequences (events provided by the subjects themselves) to control movement along a path. We suggest that the simulation used by the subjects not only helped them to encode the movements necessary to walk along the path, but also the shape of this path itself. The internal representation of the path is a composite that includes kinematic and dynamic properties related to the motor functions that underlie both navigation and locomotion.

5) Finally, what is the role played by the geometry of the path to be followed? The results are consistent with the idea that when simulating and walking, subjects used local compensation strategies to preserve the geometrical proportions of the overall path (G1-G3). This finding is consistent with the subjects' using a map-like internal representation. This was not the case for subjects who rested or memorized and immediately walked (G4-G5); when these subjects focused on local reproductions, they lost the global image of the actual path. They did not compensate for local adjustments, probably because their learning method did not allow them to store the overall shape in a map-like representation. Instead, they apparently stored some parts of the path in a route-like representation. Even when some local properties of the path were modified, the subjects in the first three groups could maintain its overall geometrical properties.

We also sought to manipulate the internal representation of the path by modifying the distances or angles of successive segments. In particular, we were interested in determining whether mental simulation could enhance the internal representation even when adjustments to variations in distances (PA) or angles (PD) were needed. Each variation was produced by changing a single parameter, either the side length or the angle between two consecutive sides. For this reason, we never compare PA and PD directly -- they are different both in terms of distance and angle. Essentially, when creating PA and PD, we also modified the symmetry properties of these two variant versions of RH. Because of its three non-orthogonal axes of symmetry (and the absence of orthogonal axis of symmetry), PA is "more complex" than RH and PD, even though RH also has three non-orthogonal axis of symmetry. Moreover, and contrary to their location during the observation phase for RH and PD, the subjects did not observed PA from a location aligned with an axis of symmetry of this particular shape. This might have also increased the complexity of their internal representation of the global image of PA.

The observed differences between the first three groups (G1-G3) and the two last ones (G4-G5) for RH and PD, and the absence of difference for PA, support the idea that the representation of space depends on the geometric properties of the environment in which the subjects operate. This result might be explained by the fact that the learning procedure adopted by the subjects in G1 to G3 led them to build an internal representation of the paths as global shapes. In these cases the subjects based their simulations on the constancy of the distances and, in so doing, were not influenced by the local modifications of the angles. For PA, we suggest that the subjects in the simulation groups failed to reconstruct a global image of the shape. They might have misinterpreted the global layout of the six sides of the paths as well as the increased complexity of this shape by using partial local views, which is consistent with their using a route-like representation at least intermittently.

This line of thought is consistent with the idea that mental simulation contributes to navigation without vision because of the regularity of the translations the subjects perform when walking. In other words, keeping the rotations constant (PA) does not contribute to the benefit subjects receive from mental simulation. Subjects had more difficulty processing the variations in distances (PA) than the variations in angles (PD). In this respect, the RH path preserves both the distances and the rotations.

Nevertheless, we suggest that the subjects in G1, G2 and G3 have better performance because this particular shape is a regular hexagon, and many subjects were probably assuming by default that a hexagon has equal sides and angles when they mentally simulated. In this case the perfect symmetry of the shape allowed the subjects to consider the path as a global shape despite the preservation of the angles. Even if the angles are preserved, the subjects could benefit from the simulation learning. The interactions between the local geometry that is embodied in the internal representation and the position of the subject in space probably obey some non-arbitrary rules (Amorim & Stucchi, 1997). In particular, our results support the hypothesis that in order to produce a locomotor path without visual information about their current position in space, subjects reconstruct this position on the base of a representation of the movement of their own body in space. In this case, the internal representation may share properties of visual mental imagery (Shepard & Metzler, 1971; Cooper & Shepard, 1973; Kosslyn et al., 1978).

However, as shown by the interactions among cognitive tasks and locomotion along complex paths, it remains difficult to demonstrate that the recorded errors originate from a deficit in the cognitive representation of space (Smyth & Waller, 1998). In other words, top-down strategies may be involved when one encodes knowledge about space, but they are

probably associated with multi-sensory information garnered through bottom-up processes. The two kinds of information are melded to produce a single representation. Because the internal representation is based on all sources of information, it is difficult to estimate the relative role played by peripheral signals versus central cartographic information. We are only now beginning to understand the relation between the deformations of the mental representation of space and the geometrical deformations of the navigation space itself. Nevertheless, it appears reasonable to infer that people use both route-like and map-like representations when navigating, and that mental simulation can affect both sorts of representations.

Figures caption

Figure V-1: Position of the paths used as models for the simulated and actual movements. A: Regular hexagon (RH) where departure / arrival point, corners and direction of locomotion are indicated. B: Preserved Angle hexagon (PA). C: Preserved Distance hexagon (PD).

Figure V-2: Experimental protocol.

Figure V-3: Paths followed. Paths followed by a typical subject of Group 1 (A), Group 3 (B) and Group 5 (C) during the 8 trials of the walking phase for the regular hexagon (RH). The crosses show the imagined corners and their positions can be compared to the position of the corresponding corner of the model.

Figure V-4: Comparison of the reproduced paths to the models. Mean and SD of: A) r and B) RMSE for all paths and each group.

Figure V-5: Parameters of the adjustment between the actual corners and the imagined corners during the walking phase. Mean and SD of the: A) length of the translation, B) amplitude of the rotation and C) scale factor applied to fit the imagined shape of the path to the actual one.

Figure V-6: Paths followed. Paths performed by the subjects of Group 5 for each hexagon during the walking phase. The crosses show the imagined corners and their positions can be compared to the position of the corresponding corner of the model.

Table caption

Table V-1: Mean and SD (cm) of RMSE for each path and group.

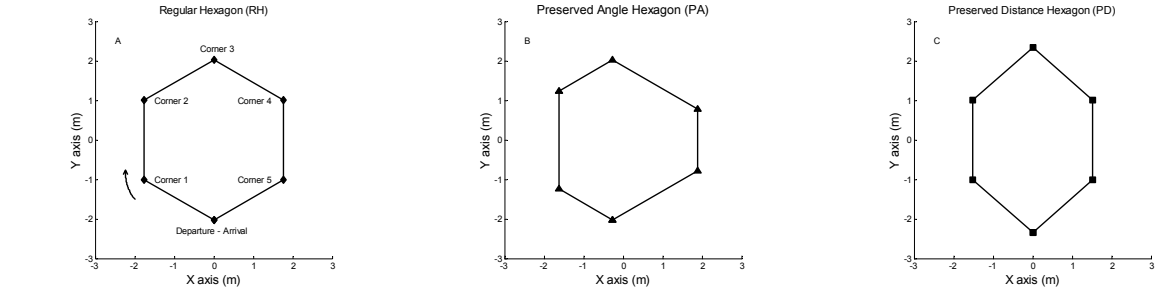

Regular Hexagon (RH)
A
Corner 3
Corner 2
Corner 4
Corner 1
Corner 5
Departure - Arrival
Y axis (m)
X axis (m)
Preserved Angle Hexagon (PA)
B
Y axis (m)
X axis (m)
Preserved Distance Hexagon (PD)
C
Y axis (m)
X axis (m)

Figure V-1

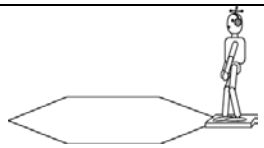
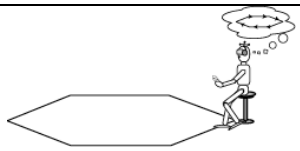
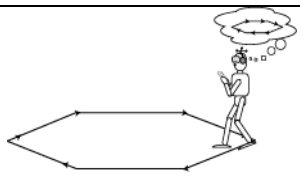
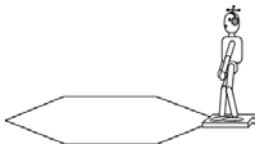
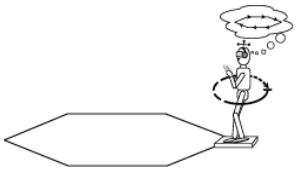
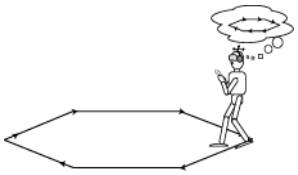
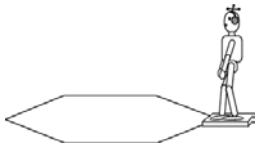
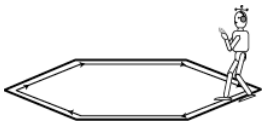
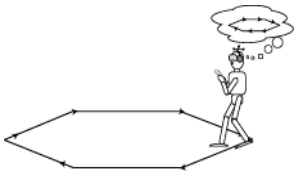
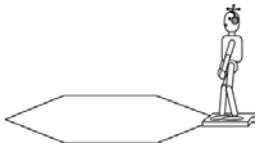
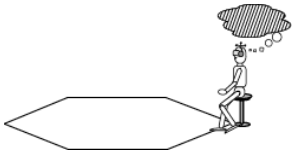
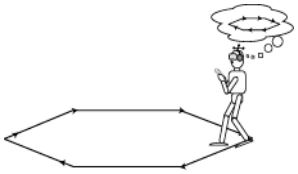
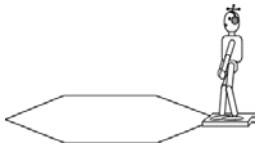
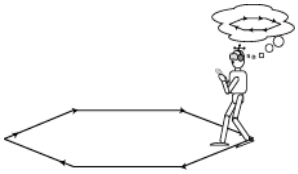
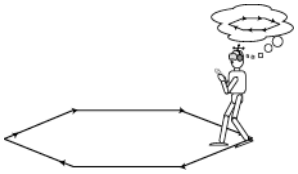
Group	Observation (2 minutes)	Learning (8 trials)	Walking (8 trials)
G1 Simulation without movement			
G2 Simulation with movement			
G3 Constrained Movement			
G4 Rest			
G5 Memorized Reproduction			

Figure V-2

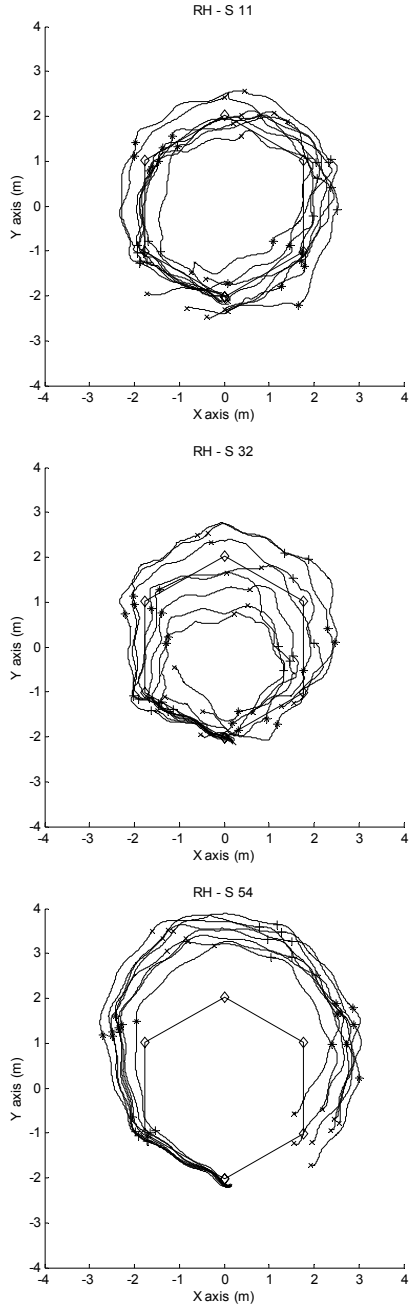

RH - S 11
Y axis (m)
X axis (m)
RH - S 32
Y axis (m)
X axis (m)
RH - S 54
Y axis (m)
X axis (m)

Figure V-3

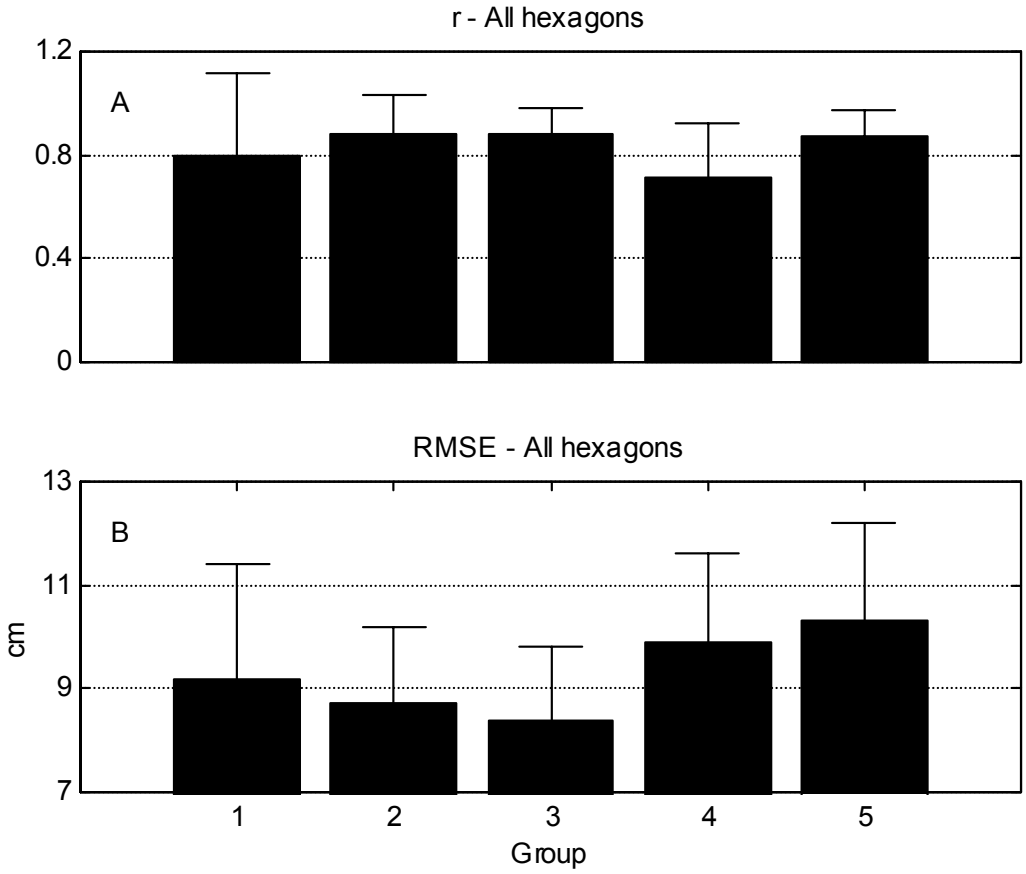

r - All hexagons
1.2
A
0.8
0.4
0
RMSE - All hexagons
13
B
11
cm
9
7
1
2
3
4
5
Group

Figure V-4

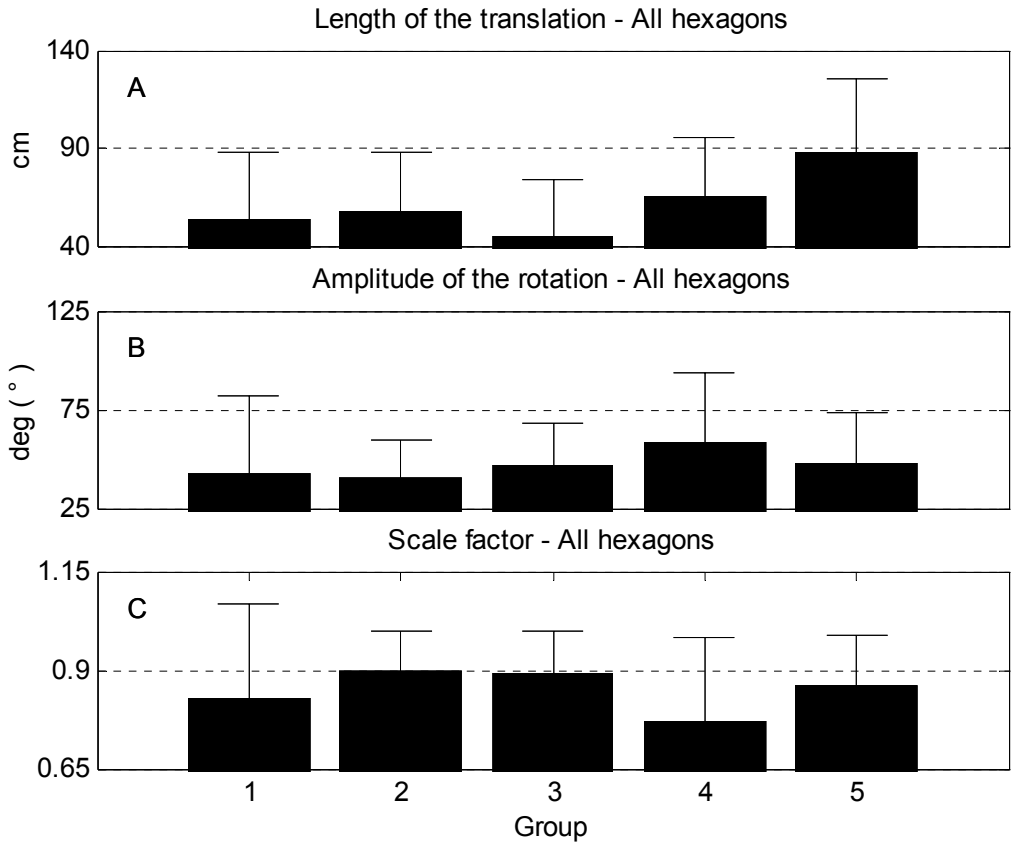

Length of the translation - All hexagons
140
A
cm
90
40
Amplitude of the rotation - All hexagons
125
B
deg (°)
75
25
Scale factor - All hexagons
1.15
C
0.9
0.65
1
2
3
4
5
Group

Figure V-5

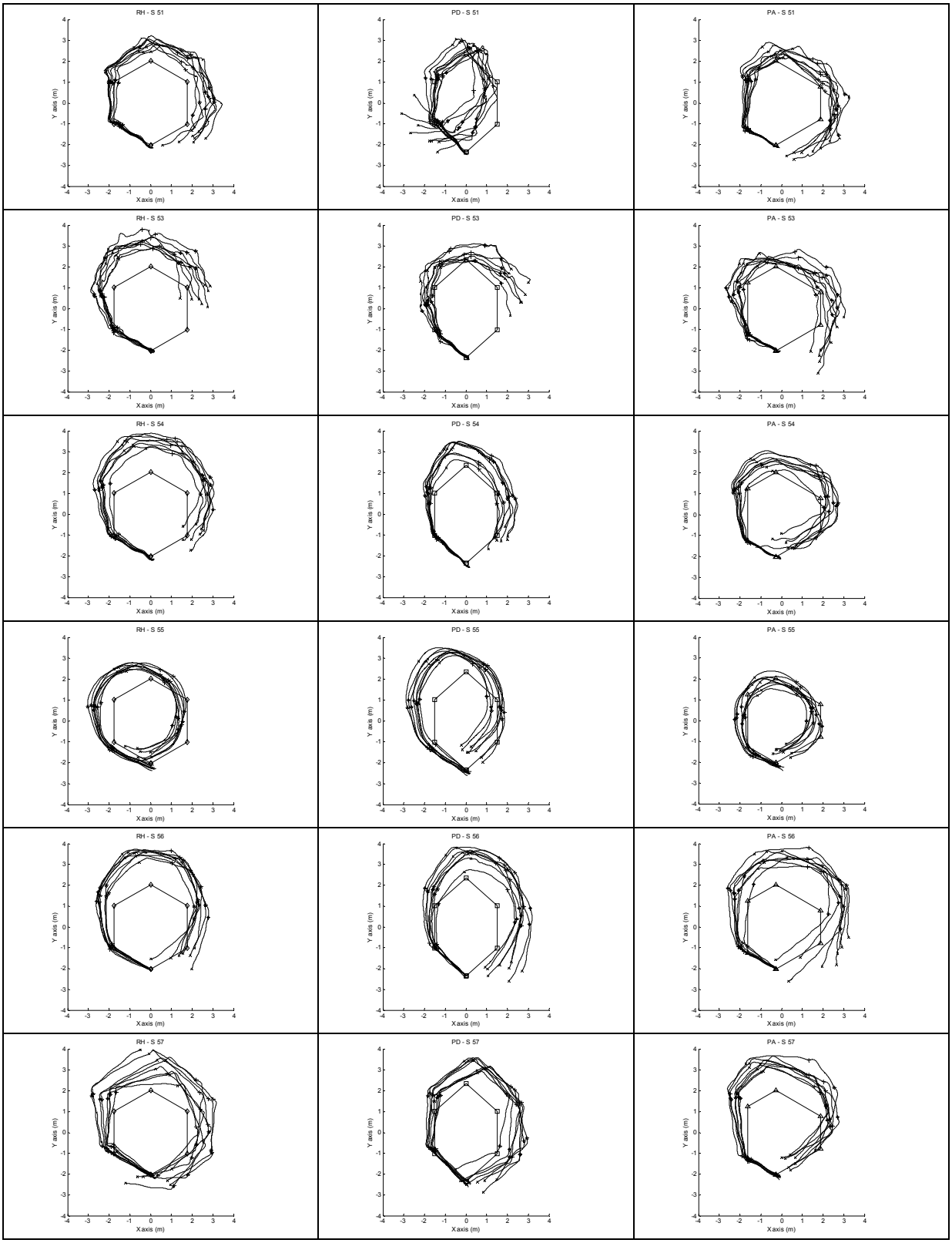

RH - S 51
PD - S 51
PA - S 51
RH - S 53
PD - S 53
PA - S 53
RH - S 54
PD - S 54
PA - S 54
RH - S 55
PD - S 55
PA - S 55
RH - S 56
PD - S 56
PA - S 56
RH - S 57
PD - S 57
PA - S 57
Y axis (m)
Xaxis (m)

Figure V-6

	RH		PA		PD	
Group	M	SD	M	SD	M	SD
G1	8.9	2.6	9.3	2.4	8.8	1.5
G2	9	1.3	9	1.5	8.2	1.7
G3	8.5	1.4	8.3	1.7	8.8	1.2
G4	10.7	1.4	9.8	1.8	9.3	1.6
G5	10.9	1.9	9.6	1.8	10.4	1.9

Table V-1

VI - Bibliographie générale

Able, K. P. (1989). Mechanisms of orientation, navigation and homing. In S.A.Guthreaux Jr. (Ed.), Animal migration, orientation and navigation (pp. 283-373). New York: Academic Press.

Adams, J. A. (1971). A closed loop theory of motor behavior. Journal of Motor Behavior, 3, 111-149.

Amorim, M. A. (1997). Mise à jour des informations spatiales accompagnant le changement de point de vue : niveaux et modes de traitement. Thèse de l'Université René Descartes (Paris V). .

Amorim, M. A. (1999). A neurocognitive approach to human navigation. In R.G.Golledge (Ed.), Wayfinding behavior cognitive mapping and other spatial processes (pp. 152-167). Baltimore: The Johns Hopkins University Press.

Amorim, M. A. & Stucchi, N. (1997). Viewer- and object-centered mental explorations of an imagined environment are not equivalent. Cognitive Brain Research, 5, 229-239.

Annett, J. (1996). On knowing how to do things: A theory of motor imagery. Cognitive Brain Research, 3, 65-69.

Arbib, M. A. (1991). Interaction of multiple representations of space in the brain. In J.Paillard (Ed.), Brain and Space (pp. 379-403). New York: Oxford Science Publications.

Batschelet, E. (1981). Circular statistics in biology. London: Academic Press.

Beek, P. J., Peper, C. E., & Stegeman, D. F. (1995). Dynamical models of movement coordination. Human Movement Science, 14, 573-608.

Benhamou, S. (1997a). On systems of reference involved in spatial memory. Behavioral Processes, 40, 149-163.

Benhamou, S. (1997b). Path integration by swimming rats. Animal Behavior, 54, 321-327.

Bennett, A. T. D. (1996). Do animals have cognitive maps? Journal of Experimental Biology, 199, 219-224.

Berg, W. P., Wade, M. G., & Greer, N. L. (1994). Visual Regulation of Gait in Bipedal Locomotion - Revisiting Lee, Lishman, and Thomson (1982). Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 20, 4, 854-863.

Bernstein, N. (1967). The Coordination and Regulation of Movements. Pergamon Press.

Berthoz, A. (1991). Reference frames for perception and control of movement. In J.Paillard (Ed.), Brain and Space (pp. 81-111). New York: Oxford Science Publications.

Berthoz, A. (1996). The role of inhibition in the hierarchical gating of executed and imagined movements. Cognitive Brain Research, 3, 101-113.

Berthoz, A. (1997). Le sens du mouvement. Editions Odile Jacob.

Berthoz, A., Amorim, M. A., Glasauer, S., Grasso, R., Takei, Y., & Viaud-Delmon, I. (1999). Dissociation between distance and direction during locomotor navigation. In R.G.Golledge (Ed.), Wayfinding behavior cognitive mapping and other spatial processes (pp. 328-348). Baltimore and London: The Johns Hopkins University Press.

Berthoz, A., Israël, I., Georges-François, P., Grasso, R., & Tsuzuku, T. (1995). Spatial memory of body linear displacement. W□hat is being stored? Science, 269, 95-98.

Biegler, R. & Morris, R. G. M. (1996). Landmark stability: Studies exploring whether the perceived stability of the environment influences spatial representation. Journal of Experimental Biology, 199, 187-193.

Binet, A. & Courtier, J. (1893). Sur la vitesse des mouvements graphiques. Revue Philosophique, 35, 664-671.

Bootsma, R. J., Mottet, D., & Zaal, F. T. J. M. (1998). Trajectory formation and speed-accuracy trade-off in aiming movements. Neuroscience, 321, 377-383.

Boucher, J. L., Velay, J. L., & Paillard, J. (1992). Evolution des erreurs en direction et en distance dans une tâche de pointage d'une cible visuelle ou proprioceptive. STAPS, 27, 21-29.

Boyadjian, A., Marin, L., & Danion, F. (1999). Veering in human locomotion: the role of the effectors. Neuroscience Letters, 265, 21-24.

Cauvin, C. (1984). Espaces cognitifs et transformations cartographiques. Les conditions de la comparaison des espaces cognitifs : de la carte aux configurations ; exemples de l'espace urbain strasbourgeois. Thèse d'Etat es Lettres et Sciences Humaines - Université de Strasbourg. .

Cheng, K. (1998). Distances and directions are computed separately by honeybees in landmark-based search. Anim.Learn.Behav., 26, 455-468.

Cheng, K. (1999a). Landmark-based spatial search in honeybees. I. Use of elements and interlandmark angles. Animal Cognition, 2, 73-78.

Cheng, K. (1999b). Landmark-based spatial search in honeybees. II. Using gaps and blocks. Animal Cognition, 2, 79-90.

Clayton, K. & Habibi, A. (1991). Contribution of temporal Contiguity to the spatial priming Effect. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 17, 263-271.

Coello, Y. & Orliaguet, J. P. (1994). Spatial adaptation of fast pointing movement to inertial perturbation: Evidence for differential adjustment of amplitude and direction. Cahiers de Psychologie Cognitive, 13, 2, 247-265.

Collett, M., Collett, T. S., & Wehner, R. (1999). Calibration of vector navigation in desert ants. Current Biology, 9, 1031-1034.

Collett, T. S. (1996). Insect navigation en route to the goal: Multiple strategies for the use of landmarks. Journal of Experimental Biology, 199, 227-235.

Collett, T. S. & Rees, J. A. (1997). View-based navigation in Hymenoptera: Multiple strategies of landmark guidance in the approach to a feeder. Journal of Comparative Physiology A, 181, 47-58.

Cooper, L. A. & Shepard, R. N. (1973). Chronometric studies of the rotation of mental images. In W.G.Chase (Ed.), Visual information processing (New York: Academic Press.

Cordier, P. & Giraudo, M. D. (1993). La représentation de l'espace chez les guides. Revue Annuelle de l'Äcole nationale de ski et d'alpinisme 43-45□□.

Cordier, P., Dietrich, G., & Pailhous, J. (1996). Harmonic analysis of a complex motor behavior. Human Movement Science, 15, 789-807.

Cordier, P., Mendès France, M., Pailhous, J., & Bolon, P. (1994). Entropy as a global variable of the learning process. Human Movement Science, 13, 745-763.

Curiel, J. M. & Radvansky, G. A. (1998). Mental organization of maps. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 24, 202-214.

Cutting, J. E. & Vishton, P. M. (1995). Perceiving layout and knowing distances: the integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In W.Epstien & S.Rogers (Ed.), Handbook of perception and cognition (pp. 69-117). San Diego: CA: Academic Press.

Dassonville, P., Schlag, J., & Schlag-Rey, M. (1995). The use of egocentric and exocentric location cues in saccadic programming. Vision Research, 35, 2191-2199.

Decety, J. (1991). Motor information may be important for updating the cognitive process involved in mental imagery of movement. Cahiers de Psychologie Cognitive, 11, 4, 415-426.

Decety, J. (1996a). Do imagined and executed actions share the same neural substrate? Cognitive Brain Research, 3, 87-93.

Decety, J. (1996b). The neurophysiological basis of motor imagery. Behavioral Brain Research, 77, 45-52.

Decety, J. & Jeannerod, M. (1996). Mentally simulated movements in virtual reality: Does Fitts's law hold in motor imagery? Behavioral Brain Research, 72, 127-134.

Decety, J., Jeannerod, M., Durozard, D., & Baverel, G. (1993). Central activation of autonomic effectors during mental simulation of motor actions in man. Journal of Physiology, 461, 549-563.

Decety, J., Jeannerod, M., Germain, M., & Pastene, J. (1991). Vegetative response during imagined movement is proportional to mental effort. Behavioral Brain Research, 42, 1-5.

Decety, J., Jeannerod, M., & Prablanc, C. (1989). The timing of mentally represented actions. Behavioral Brain Research, 34, 35-42.

Decety, J., Perani, D., Jeannerod, M., Bettinardi, V., Tadary, B., Woods, R., Mazziotta, J. C., & Fazio, F. (1994). Mapping motor representations with positron emission tomography. Nature, 371, 600-602.

Deecke, L. (1996). Planning, preparation, execution, and imagery of volitional action. Cognitive Brain Research, 3, 59-64.

Denis, M. (1985). Visual imagery and the use of mental practice in the development of motor skills. Canadian Journal of Applied Sport Sciences, 10, 4S-16S.

Denis, M. (1989). Image et cognition. Presses Universitaires de France.

Denis, M. (1997). The description of routes: A cognitive approach to the production of spatial discourse. Cahiers de Psychologie Cognitive, 16, 409-458.

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

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

Denton, T. A. & Diamond, G. A. (1991). Can the analytic techniques of nonlinear dynamics distinguish periodic, random and chaotic signals? Computational Biological Medicine, 21, 4, 243-264.

Desperati, C. & Stucchi, N. (1997). Recognizing the motion of a graspable object is guided by handedness. Neuroreport, 8, 2761-2765.

Dupuy, C. (1991). Contribution à l'analyse de l'habileté de grimper : Essai de taxonomie gestuelle. In C.Dupuy (Ed.), Actes du Colloque Escalade. E.N.S.A. Chamonix 89 (pp. 163-173). Joinville-le-Pont: Actio.

Dupuy, C. & Ripoll, H. (1989). Analyse des stratégies visuelles chez le grimpeur de haut niveau. Sciences et motricitÄ, 7, 19-26.

Dupuy, C., Ripoll, H., & Flahaut, J. J. (1992). Organisation spatio temporelle de la motricité en escalade sportive. In M.Laurent, J. F. Marini, & P. Therme (Eds.), Recherches en APS 3 : Les performances motrices (pp. 233-253). Paris: Actio / UniversitÄ Aix Marseille II.

Durier, V. & Rivault, C. (1999). Path integration in cockroach larvae, Blattella germanica (L.) (Insect : Dictyoptera): Direction and distance estimation. Anim.Learn.Behav., 27, 108-118.

Elliott, D. (1987). The influence of walking speed and prior practice on locomotor distance estimation. Journal of Motor Behavior, 19, 476-485.

Etienne, A. S., Maurer, R., Georgakopoulos, J., & Griffin, A. S. (1999). Dead reckoning (path integration), landmarks, and representation of space in a comparative perspective. In R.G.Golledge (Ed.), Wayfinding behavior cognitive mapping and other spatial processes (pp. 197-228). Baltimore and London: The Johns Hopkins University Press.

Etienne, A. S., Maurer, R., & Seguinot, V. (1996). Path integration in mammals and its interaction with visual landmarks. Journal of Experimental Biology, 199, 201-209.

Farrell, M. J. & Robertson, I. H. (1998). Mental rotation and the automatic updating of body- centered spatial relationships. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 24, 227-233.

Farrell, M. J. & Thomson, J. A. (1998). Automatic spatial updating during locomotion without vision. Quarterly Journal of Experimental Psychology, 51A, 637-654.

Farrell, M. J. & Thomson, J. A. (1999). On-line updating of spatial information during locomotion without vision. Journal of Motor Behavior, 31, 39-53.

Feltz, D. L. & Landers, D. M. (1983). The effects of mental practice on motor skill learning and performance: A meta-analysis. Journal of Sport Psychology, 5, 25-57.

Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. Journal of Experimental Psychology, 47, 6, 381-391.

Flash, T. & Hogan, N. (1985). The coordination of arm movements: An experimentally confirmed mathematical model. The Journal of Neuroscience, 5, 7, 1688-1703.

Fujita, N., Klatzky, R. L., & Loomis, J. M. (1993). The encoding-error model of pathway completion without vision. Geographical Analysis, 25, 4, 295-314.

Fukusima, S. S., Loomis, J. M., & Dasilva, J. A. (1997). Visual perception of egocentric distance as assessed by triangulation. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 23, 86-100.

Gallistel, C. R. (1990). The organization of learning. MA: MIT Press / Bradford Books.

Gallistel, C. R. & Cramer, A. E. (1996). Computations on metric maps in mammals: Getting oriented and choosing a multi-destination route. Journal of Experimental Biology, 199, 211-217.

Gaunet, F., Martinez, J. L., & Thinus-Blanc, C. (1997). Early-blind subjects' spatial abilities in the manipulatory space: A study of exploratory strategies and reaction to change performance. Perception, 26, 345-366.

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

Georges-François, P., Grasso, R., Berthoz, A., & Israël, I. (1995). Self-controlled reproduction of passive linear displacement: distance, duration and velocity. In T.Mergner & F. Hlavacka (Eds.), Multisensory control of posture (pp. 199-206). New York: Plenum Press.

Georgopoulos, A. P., Lurito, J. T., Petrides, M., Schwartz, A. B., & Massey, J. T. (1989). Mental rotation of the neuronal population vector. Science, 243, 234-236.

Georgopoulos, A. P. & Pellizzer, G. (1995). The mental and the neural: Psychological and neural studies of mental rotation and memory scanning. Neuropsychologia, 33, 1531-1547.

Ghaem, O., Mellet, E., Crivello, F., Tzourio, N., Mazoyer, B. M., Berthoz, A., & Denis, M. (1997). Mental navigation along memorized routes activates the hippocampus, precuneus, and insula. Neuroreport, 8, 739-744.

Giraudo, M. D. (1989). Espace urbain : image mentale et déformation fonctionnelle. Thèse de l'Université de Provence - Aix Marseille I. .

Giraudo, M. D. & Pailhous, J. (1994). Distortions and fluctuations in topographic memory. Memory & Cognition, 22, 1, 14-26.

Giraudo, M. D. & Pailhous, J. Dynamic instability of visuo-spatial images. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance (in press).

Giurfa, M. & Capaldi, E. A. (1999). Vectors, routes and maps: new discoveries about navigation in insects. Trends in Neurosciences, 22, 6, 237-242.

Glasauer, S., Amorim, M. A., Bloomberg, J. J., Reschke, M. F., Peters, B. T., Smith, S. L., & Berthoz, A. (1995). Spatial orientation during locomotion following space flight. Acta Astronautica, 8, 12, 423-431.

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

Glasauer, S., Viaud-Delmon, I., Amorim, M. A., & Berthoz, A. Steering of locomotion: II. Dissociation of distance and direction. 2000. Ref Type: Unpublished Work

Gordon, C. R., Fletcher, W. A., Melvill Jones, G., & Block, E. W. (1995). Adaptative plasticity in the control of locomotor trajectory. Experimental Brain Research, 102, 540-545.

Grasso, R., Glasauer, S., Takei, Y., & Berthoz, A. (1996). The predictive brain: anticipatory control of head direction for the steering of locomotion. Neuroreport, 7, 1170-1174.

Gribble, P. L. & Ostry, D. J. (1996). Origins of the power law relation between movement velocity and curvature: Modeling the effects of muscle mechanics and limb dynamics. Journal of Neurophysiology, 76, 5, 2853-2860.

Grusser, O. J. (1983). Multimodal structure of the extrapersonal space. In A.Hein & M. Jeannerod (Eds.), Spatially oriented behavior (pp. 327-352). New York: Springer-Verlag.

Harris, L. R., Jenkin, M., & Zikovitz, D. C. (2000). Vestibular capture of the perceived distance of passive linear self motion. Archives Italiennes de Biologie, 138, 1, 63-72.

Harris, M. H. & Wolpert, D. M. (1998). Signal-dependant noise determines motor planning. Nature, 394, 780-784.

Hartmann, G. & Wehner, R. (1995). The ant's path integration system: A neural architecture. Biological Cybernetics, 73, 483-497.

Hebb, D. O. (1949). The organization of behavior. New-York: Wiley.

Hubbard, T. L. (1995a). Cognitive Representation of Motion - Evidence for Friction and Gravity Analogues. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 21, 241-254.

Hubbard, T. L. (1995b). Environmental invariants in the representation of motion: Implied dynamics and representational momentum, gravity, friction, and centripetal force. Psychological Bulletin Review, 2, 322-338.

Israël, I. (1998). Perception du mouvement propre : mécanismes et limites. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches. Université Pierre et Marie Curie (Paris VI). .

Israël, I., Bronstein, A. M., Kanayama, R., Faldon, M., & Gresty, M. A. (1996). Visual and vestibular factors influencing vestibular "navigation". Experimental Brain Research, 112, 411-419.

Israël, I., Grasso, R., Georges-François, P., Tsuzuku, T., & Berthoz, A. (1997). Spatial memory and path integration studied by self-driven passive linear displacement. 1. Basic properties. Journal of Neurophysiology, 77, 3180-3192.

Israël, I., Koenig, E., & Fetter, M. (1993). Vestibular perception of passive whole-body rotation about horizontal and vertical axes in humans: goal-directed vestibulo-ocular reflex and vestibular memory-contingent saccades. Experimental Brain Research, 96, 335-346.

Israël, I., Sievering, D., & Koenig, E. (1995). Self-rotation Estimate about the Vertical Axis. Acta Oto-Laryngologica, 115, 3-8.

Ivanenko, Y. P., Grasso, R., Israël, I., & Berthoz, A. (1997a). Spatial orientation in humans: perception of angular whole-body displacements in two-dimensional trajectories. Experimental Brain Research, 117, 419-427.

Ivanenko, Y. P., Grasso, R., Israël, I., & Berthoz, A. (1997b). The contribution of otoliths and semicircular canals to the perception of two dimensional passive whole-body motion in humans. Journal of Physiology (London), 502, 223-233.

Jack, W. R. (1895). On the analysis of voluntary muscular movements by certain new instruments. Journal of Anatomy and Physiology, 29, 473-478.

Jacobson, E. (1932). Electrophysiology of mental activities. American Journal of Psychology, 44, 677-694.

Jahanshahi, M., Jenkins, H., Brown, R. G., Marsden, C. D., Passingham, R. E., & Brooks, D. J. (1996). Self-initiated versus externally triggered movements .1. An investigation using measurement of regional cerebral blood flow with PET and movement-related potentials in normal and Parkinson's disease subjects - Reply. Brain, 119, 1046-1048.

James, W. (1892). Textbook of psychology. London: McMillan & Co.

Jander, R. (1957). Die optische richtungsorientierung der roten waldameise (fornica rufa l.). Z.Vergl.Pysiol, 40, 162-238.

Jeannerod, M. (1994). The representating brain: Neural correlates of motor intention and imagery. Behavioral and Brain Sciences, 17, 187-245.

Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. Perception and Psychophysics, 14, 201-211.

Jones, L. & Stuth, G. (1997). The uses of mental imagery in athletics: An overview. Applied Preview in Psychology, 6, 101-115.

Judd, S. P. D. & Collett, T. S. (1998). Multiple stored views and landmark guidance in ants. Nature, 392, 710-714.

Judd, S. P. D., Dale, K., & Collett, T. S. (1999). On the fine structure of view-based navigation in insects. In R.G.Golledge (Ed.), Wayfinding behavior cognitive mapping and other spatial processes (pp. 229-258). Baltimore and London: The Johns Hopkins University Press.

Jurgens, R., Boss, T., & Becker, W. (1999). Estimation of self-turning in the dark: comparison between active and passive rotation. Experimental Brain Research, 128, 491-504.

Keele, S. W. (1968). Movement control in skilled motor performance. Psychological Bulletin, 70,6, Part 1, 387-403.

Klatzky, R. L. (1999). Path completion after haptic exploration without vision: implications for haptic spatial representations. Perception and Psychophysics, 61,2, 220-235.

Klatzky, R. L., Beall, A. C., Loomis, J. M., Golledge, R. G., & Philbeck, J. W. (1999). Human navigation ability: tests of the encoding-error model of path integration. Spatial Cognition and Computation, 1, 31-65.

Klatzky, R. L., Loomis, J. M., & Golledge, R. G. (1997). Encoding spatial representations through nonvisually guided locomotion: Tests of human path integration. The Psychology of Learning and Motivation, 37, 41-83.

Klatzky, R. L., Loomis, J. M., Golledge, R. G., Cicinelli, J. G., Doherty, S., & Pellegrino, J. W. (1990). Acquisition of route and survey knowledge in the absence of vision. Journal of Motor Behavior, 22,1, 19-43.

Kosslyn, S. M. (1980). Image and mind. (1 ed.) Cambridge: Harvard University Press.

Kosslyn, S. M. (1996). Image and brain. Cambridge: The MIT Press.

Kosslyn, S. M., Ball, T. M., & Reiser, B. J. (1978). Visual images preserve metric spatial information: Evidence from studies of mental scanning. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 4, 47,1-60.

Kosslyn, S. M., Pick, H. L., & Fariello, G. R. (1974). Cognitive maps in children and men. Child Development, 45, 707-716.

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

Kugler, P. N. & Turvey, M. T. (1988). Self-organization, flow fields, and information. Human Movement Science, 7, 97-129.

Kuipers, B. J. (1982). The "map in the head" methaphor. Environment and Behavior, 14, 202-220.

Lacquaniti, F., Terzuolo, C., & Viviani, P. (1983). The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. Acta Psychologica, 54, 115-130.

Laurent, M. & Thomson, J. A. (1988). The role of visual information in control of a constrained locomotor task. Journal of Motor Behavior, 20,1, 17-37.

Lea, G. (1975). Chronometric analysis of the method of loci. Journal of Experimental Psychology, 2, 95-104.

Lee, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. Perception, 5, 437-459.

Lee, D. N. (1998). Guiding movement by coupling taus. Ecological Psychology, 10, 221-250.

Lee, D. N., Lishman, J. R., & Thomson, J. A. (1982). Regulation of gait in long jumping. Journal of Experimental Psychology, 3, 448-457.

Lee, D. N. & Thomson, J. A. (1982). Vision in action: the control of locomotion. In D.Ingle, M. A. Goodale, & R. J. W. Mansfield (Eds.), Analysis of visual behavior (pp. 411-433). Cambridge: The MIT Press.

Leone, G., Taine, M. C., & Droulez, J. (1993). The influence of long-term practice on mental rotation of 3D objects. Cognitive Brain Research, 1, 241-255.

Levitt, T. S. & Lawton, D. T. (1990). Qualitative navigation for mobile robots. Artificial Intelligence, 44, 305-360.

Loomis, J. M., Da Silva, J. A., Fujita, N., & Fukusima, S. S. (1992). Visual space perception and visually-directed action. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 18,4, 906-921.

Loomis, J. M., Dasilva, J. A., Philbeck, J. W., & Fukusima, S. S. (1996). Visual perception of location and distance. Current Directions in Psychogical Sciences, 5, 72-77.

Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Golledge, R. G., Cicinelli, J. G., Pellegrino, J. W., & Fry, P. A. (1993). Nonvisual navigation by blind and sighted: assesment of path integration ability. Journal of Experimental Psychology: General, 122,1, 73-91.

Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Golledge, R. G., & Philbeck, J. W. (1999). Human navigation by path integration. In R.G.Golledge (Ed.), Wayfinding behavior cognitive mapping and other spatial processes (pp. 125-151). Baltimore and London: The Johns Hopkins University Press.

Mahoney, M. J. & Avener, M. (1987). Psychology of the elite athlete. An exploratory study. Cognitive Therapy and Research, 1, 135-141.

Mardia, K. V. & Jupp, P. E. (2000). Directional statistics. (2 ed.) Chichester: Wiley.

Mark, D. M., Freksa, C., Hirtle, S. C., Lloyd, R., & Tversky, B. (1999). Cognitive models of geographical space. International Journal of Geographical Information Sciences, 13, 747-774.

Marlinsky, V. V. (1999a). Vestibular and vestibulo-proprioceptive perception of motion in the horizontal plane in blindfolded man - I. Estimations of linear displacement. Neuroscience, 90, 389-394.

Marlinsky, V. V. (1999b). Vestibular and vestibulo-proprioceptive perception of motion in the horizontal plane in blindfolded man - II. Estimations of rotations about the earth-vertical axis. Neuroscience, 90, 395-401.

Marlinsky, V. V. (1999c). Vestibular and vestibulo-proprioceptive perception of motion in the horizontal plane in blindfolded man - III. Route inference. Neuroscience, 90, 403-411.

Massey, J. T., Lurito, J. T., Pellizzer, G., & Georgopoulos, A. P. (1992). Three-dimensional drawings in isometric conditions: relation between geometry and kinematics. Experimental Brain Research, 88, 685-690.

McIntyre, J., Stratta, F., & Lacquaniti, F. (1997). Viewer-centered frame of reference for pointing to memorized targets in three-dimensional space. Journal of Neurophysiology, 78, 1601-1618.

McIntyre, J., Stratta, F., & Lacquatini, F. (1998). Short-term memory for reaching to visual targets: Psychophysical evidence for body-centered reference frames. The Journal of Neuroscience, 18,20, 8423-8435.

McNamara, T. P. (1986). Mental representations of spatial relations. Cognitive Psychology, 18, 87-121.

McNamara, T. P., Halpin, J. A., & Hardy, J. K. (1992). Spatial et temporal Contributions to the Structure of spatial Memory. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 18, 555-564.

Mellet, E., Bricogne, S., TzourioMazoyer, N., Ghaem, O., Petit, L., Zago, L., Etard, O., Berthoz, A., Mazoyer, B., & Denis, M. (2000). Neural correlates of topographic mental exploration: The impact of route versus survey perspective learning. Neuroimage, 12, 588-600.

Mellet, E., Tzourio, N., Denis, M., & Mazoyer, B. M. (1995). A positron emission tomography study of visual and mental spatial exploration. Journal of Cognitive Neuroscience, 7, 433-445.

Melvill Jones, G. & Berthoz, A. (1985). Mental control of the adaptive process. In A.Berthoz & G. Melvill Jones (Eds.), Adaptive mechanisms in gaze control facts and theories (pp. 203-344). Paris: Elsevier Science Publishers BV.

Melvill Jones, G., Berthoz, A., & Segal, B. Adaptive modification of the vestibulo-ocular reflex by mental effort in darkness. Experimental Brain Research 56, 149-153. 1984. Ref Type: Abstract

Millar, S. (1999). Veering re-visited: noise and posture cues in walking without sight. Perception, 28, 765-780.

Mittelstaedt, H. (1962). Control systems of orientation in insects. Annual Review of Entemology, 7, 177-198.

Mittelstaedt, H. & Mittelstaedt, M. L. (1982). Homing by path integration. In F.Papi & H. G. Wallraff (Eds.), Avian navigation (pp. 290-297). New York: Springer-Verlag.

Mittelstaedt, M. L. & Glasauer, S. (1991). Idiothetic Navigation in Gerbils and Humans. Zoologische, Jahrbucher: Arbteilungen fur allgemeine Zoologie und Physiologie der Tierre, 95, 427-435.

Mottet, D. & Bootsma, R. J. (1999). The dynamics of goal-directed rhythmical aiming. Biological Cybernetics, 80, 235-245.

Müller, M. & Wehner, R. (1988). Path integration in desert ants, cataglyphis fortis. Proceeding of the National Academy of Sciences.USA, 85, 5287-5290.

O'Keefe, J. & Nadel, L. (1978). The hyppocampus as a cognitive map. Oxford, UK: Clarendon Press.

Osu, R., Uno, Y., Koike, Y., & Kawato, M. (1997). Possible explanations for trajectory curvature in multijoint arm movements. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 23, 890-913.

Pailhous, J. (1970). La représentation de l'espace urbain. Presses Universitaires de France.

Paillard, J. (1971). Les déterminants moteurs de l'organisation spatiale. Cahiers de Psychologie, 14, 261-316.

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

Parsons, L. M. (1987). Imagined spatial transformation of one's hand and feet. Cognitive Psychology, 19, 178-241.

Parsons, L. M. (1994). Temporal and Kinematic Properties of Motor Behavior Reflected in Mentally Simulated Action. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 20, 4, 709-730.

Patla, A. E., Adkin, A., & Ballard, T. (1999). Online steering: coordination and control of body center of mass, head and body reorientation. Experimental Brain Research, 129, 629-634.

Pellizzer, G. (1996). Mental transformations in the motor cortex. Cognitive Brain Research, 5, 123-130.

Pellizzer, G. (1997). Transformation of the intended direction of movement during continuous motor trajectories. Neuroreport, 8, 3447-3452.

Pellizzer, G., Richter, H., & Georgopoulos, A. P. (1999). Drawing under visuomotor incongruence. Experimental Brain Research, 125, 115-121.

Peruch, P. & Gaunet, F. (1998). Virtual environments as a promising tool for investigating human spatial cognition. Cahiers de Psychologie Cognitive, 17, 881-899.

Peruch, P., May, M., & Wartenberg, F. (1997). Homing in virtual environments: Effects of field of view and path layout. Perception, 26, 301-311.

Peruch, P., Vercher, J. L., & Gauthier, G. M. (1995). Acquisition of spatial knowledge through visual exploration of simulated environments. Ecological Psychology, 7, 1-20.

Piaget, J. & Inhelder, B. (1966). L'image mentale chez l'enfant. Presses Universitaires de France.

Pick, H. L., Wagner, D., Rieser, J. J., & Garing, A. E. (1999). The recalibration of rotational locomotion. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 25, 1179-1188.

Poincaré, H. (1930). Science et méthode. Paris: Flammarion.

Poincaré, H. (1968). La science et l'hypothèse. Paris: Flammarion.

Poincaré, H. (1970). La valeur de la science. Paris: Flammarion.

Pollick, F. E. & Sapiro, G. (1999). Constant affine velocity predicts the 1/3 power law of planar motion perception and generation. Vision Research, 37,3, 347-353.

Prescott, A. J. (1994). Explorations in reinforcement and model-based learning. Ph D thesis. Department of Psychology. University of Sheffield, U.K. .

Previc, F. H. (1990). Functional specialization in the lower and upper visual fields in humans: Its ecological origins and neurophysiological implications. Behavioral and Brain Sciences, 13, 519-575.

Previc, F. H. (1993). Functional interactions in 3-D visual space: Implications for visual displays. Society for Information Display International Symposium.Digest of Technical Papers, 24, 188-190.

Previc, F. H. (1998). The neuropsychology of 3-D space. Psychological Bulletin, 124, 123-164.

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

Redish, A. D. (1997). Beyond the cognitive map: Contibutions to a computational neuroscience theory of rodent navigation. PhD Thesis. Carnegie Mellon University. School of computer science. .

Rieser, J. J., Ashmead, D. H., Talor, C. R., & Youngquist, G. A. (1990). Visual perception and guidance of locomotion without vision to previously seen targets. Journal of Motor Behavior, 19, 675-689.

Rieser, J. J., Pick, H. L., Ashmead, D. H., & Garing, A. E. (1995). Calibration of human locomotion and models of perceptual-motor organization. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 21, 480-497.

Rizzolatti, G. & Camarda, R. (1987). Neural circuits for spatial attention and unilateral neglect. In M.Jeannerod (Ed.), Neurophysiological and neuropsychological aspects of spatial neglect (pp. 289-313). Amsterdam: North-Holland.

Roland, P. E., Larsen, B., Lassen, N. A., & Skinhoj, E. (1980). Supplementary motor area and other cortical areas in organization of volontary movements in man. Journal of Neurophysiology, 43,1, 118-136.

Saltzman, E. (1979). Levels of sensorimotor representations. Journal of Mathematical Psychology, 20, 91-163.

Saltzman, E. L. & Kelso, J. A. S. (1987). Skilled actions: a task-dynamic approach. Psychological Review, 94,1, 84-106.

Sauvé, J. P. (1989). L'orientation spatiale : formalisation d'un modèle de mémorisation égocentrée et expérimentation chez l'homme. Thèse de l'Université d'Aix Marseille II. .

Savoy, C. & Beitel, P. (1996). Mental imagery for basketball. Int.J.Sport Psychol., 27, 454-462.

Schatz, B., Chameron, S., Beugnon, G., & Collett, T. S. (1999). The use of path integration to guide route learning in ants. Nature, 399,24, 769-772.

Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. Psychological Review, 82, 4, 225-260.

Schwartz, D. L. (1999). Physical imagery: Kinematic versus dynamic models. Cognitive Psychology, 38, 433-464.

Shepard, R. N. (1984). Ecological constraints on internal representation : resonant kinematics of perceiving, imagining, thinking, and dreaming. Psychological Review, 91,4, 417-447.

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

Sinai, M. J., Ooi, T. L., & He, Z. J. (1998). Terrain influences the accurate judgement of distance. Nature, 395, 497-500.

Smyth, M. M. & Waller, A. (1998). Movement imagery in rock climbing: Patterns of interference from visual, spatial and kinaesthetic secondary tasks. Applied Cognitive Psychology, 12, 145-157.

Soechting, J. F. & Flanders, M. (1989). Sensorimotor representations for pointing to targets in three-dimensional space. Journal of Neurophysiology, 62,2, 582-594.

Soechting, J. F. & Flanders, M. (1994). Moving in three-dimensional space: frames of reference, vectors and coordinate systems. Annual Review of Neurosciences, 15, 167-191.

Soechting, J. F., Lacquaniti, F., & Terzuolo, C. A. (1986). Coordination of arm-movements in three-dimensional space. Sensorimotor mapping during drawing movement. Neuroscience, 17, 2, 295-311.

Sternad, D. & Schaal, S. (1999). Segmentation of endpoint trajectories does not imply segmented control. Experimental Brain Research, 124, 118-136.

Takei, Y., Grasso, R., Amorim, M. A., & Berthoz, A. (1997). Circular trajectory formation during blind locomotion: A test for path integration and motor memory. Experimental Brain Research, 115, 361-368.

Takei, Y., Grasso, R., & Berthoz, A. (1996). Quantitative analysis of Human walking trajectory on a circular path in darkness. Brain Research Bulletin, 40, 491-496.

Thinus-Blanc, C. (1983). De l'espace perçu à l'espace représenté : étude des mécanismes d'orientation spatiale chez les mammifères. Thèse de doctorat es Sciences - Aix Marseille II. .

Thinus-Blanc, C. & Gaunet, F. (1999). Spatial processing in animals and humans: the organizing function of representations for information gathering. In R.G.Golledge (Ed.), Wayfinding behavior cognitive mapping and other spatial processes (pp. 294-307). Baltimore and London: The Johns Hopkins University Press.

Tobler, W. R. (1976). The geometry of mental maps. In G.Rushton & R. G. Golledge (Eds.), Spatial choice and spatial behavior (pp. 69-82). Columbus: Ohio State University.

Tobler, W. R. Bidimensional regression: a computer program. University of California. Santa Barbara. 1977.
Ref Type: Unpublished Work

Tobler, W. R. (1978). Comparison of plane forms. Geographical Analysis, 2, 154-162.

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

Treves, A. & Rolls, E. T. (1991). What determinates the Capacity of auto-associative Memories in the Brain? Network, 2, 371-397.

Trullier, O., Wiener, S. I., Berthoz, A., & Meyer, J. A. (1997). Biologically based artificial navigation systems: Review and prospects. Progress in Neurobiology, 51, 483-544.

Tversky, B. (1993). Cognitive maps, cognitive collages, and spatial mental models. In A.U.Franks & I. Campari (Eds.), Spatial information theory: A theoretical basis for GIS. (pp. 14-24). Berlin: Springer-Verlag.

Tversky, B., Morrison, J. B., Franklin, N., & Bryant, D. J. (1999). Three spaces of spatial cognition. The Professional geographer, 51, 516-524.

Uno, Y., Kawato, M., & Suzuki, R. (1989). Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement. Biological Cybernetics, 61, 89-101.

Vereijken, B., Van Emmerik, R. E. A., Whiting, H. T. A., & Newell, K. M. (1992). Freezing degrees of freedom in skill acquisition. Journal of Motor Behavior, 24,1, 133-142.

Vieilledent, S., Dietrich, G., & Berthoz, A. (1996). Etude de la représentation mentale de trajets locomoteurs : le cas de l'escalade sportive. Archives of Physiology, Biochemistry, 104, 5, 556.

Vieilledent, S., Dietrich, G., & Berthoz, A. Les contraintes motrices externes sont elles représentées dans le mouvement simulé ? 7e CongrÄs International de l'ACAPS, Marseille,

France . 1997.
Ref Type: Abstract

Viviani, P. (1986). Do units of motor action really exist? Experimental Brain Research, 15, 202-216.

Viviani, P. (1991). Les habiletés motrices. In M.Richelle, J. Requin, & M. Robert (Eds.), Traité de Psychologie Expérimentale (pp. 777-857). Paris: Presses Universitaires de France.

Viviani, P., BaudBovy, G., & Redolfi, M. (1997). Perceiving and tracking kinesthetic stimuli: Further evidence of motor-perceptual interactions. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 23, 1232-1252.

Viviani, P. & Cenzato, M. (1985). Segmentation and coupling in complex movements. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 11, 6, 828-845.

Viviani, P. & Flash, T. (1995). Minimum-jerk, two-thirds power law, and isochrony: converging approaches to movement planning. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 21,1, 32-53.

Viviani, P. & Schneider, R. (1991). A developmental study of the relationship between geometry and kinematics in drawing movements. Journal of Experimental Child Psychology, 17,1, 198-218.

Viviani, P. & Stucchi, N. (1989). The effect of movement velocity on form perception: Geometric illusions in dynamic displays. Perception and Psychophysics, 46,3, 266-274.

Viviani, P. & Stucchi, N. (1992). Biological movements look uniform: Evidence of motor-perceptual interactions. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 18, 3, 603-623.

Viviani, P. & Terzuolo, C. (1982). Trajectory determines movement dynamics. Neuroscience, 7,2, 431-437.

Viviani, P. & Terzuolo, C. A. (1980). Space-time invariance in learned motor skills. In G.E.Stelmach & J. Requin (Eds.), Tutorials in Motor Behavior (pp. 525-533). Amsterdam: North-Holland.

Viviani, P. & Velay, J. L. (1987). Spatial coding of voluntary saccades in man. In J.K.O'Regan & A. Levy-Schoen (Eds.), Eye movements : From physiology to cognition (pp. 69-78). Elsevier science publishers B.V.

Von Holst, E. & Mittelstaedt, H. (1950). Das Reafferenzprinzip (Wechselwirkungen zwischen zentralnervensystem und peripherie). Naturwissenschaften, 37, 464-476.

Wann, J. P., Nimmo-Smith, I., & Wing, A. M. (1988). Relation between velocity and curvature in movement: Equivalence and divergence between a power law and a minimum-jerk model. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 14,4, 622-637.

Wehner, T., Vogt, S., & Stadler, M. (1984). Task-specific EMG-characteristics during mental training. Psychological Research, 46, 389-401.

Wexler, M., Kosslyn, S. M., & Berthoz, A. (1998). Motor processes in mental rotation. Cognition, 68, 77-94.

Whishaw, I. Q., McKenna, J. E., & Maaswinkel, H. (1997). Hippocampal lesions and path integration. Current Opinion in Neurobiology, 7, 228-234.

Wiltschko, R. (1996). The function of olfactory input in pigeon orientation: Does it provide navigational information or play another role? Journal of Experimental Biology, 199, 113-119.

Wiltschko, R. & Wiltschko, W. (1999). Compass orientation as a basic element in avian orientation and navigation. In R.G.Golledge (Ed.), Wayfinding behavior cognitive mapping and other spatial processes (pp. 259-293). Baltimore and London: The Johns Hopkins University Press.

Wiltschko, W., Munro, U., Ford, H., & Wiltschko, R. (1998). Effect of a magnetic pulse on the orientation of silvereyes, Zosterops-l-lateralis, during spring migration. Journal of Experimental Biology, 201, 3257-3261.

Wiltschko, W. & Wiltschko, R. (1996). Magnetic orientation in birds. Journal of Experimental Biology, 199, 29-38.

Winter, D. A., Sidwall, H. G., & Hobson, D. A. (1974). Measurement and reduction of noise in kinematics of locomotion. Journal of Biomechanics, 7, 157-159.

Wittmann, T. & Schwegler, H. (1995). Path integration - A network model. Biological Cybernetics, 73, 569-575.

Wraga, M., Creem, S. H., & Proffitt, D. R. (1999). The influence of spatial reference frames on imagined object-and viewer rotations. Acta Psychologica, 102, 247-264.

Wuyam, B., Moosavi, S. H., Decety, J., Adams, L., Lansing, R. W., & Guz, A. (1995). Imagination of dynamic exercise produced ventilatory responses which were more apparent in competitive sportsmen. Journal of Physiology, 482, 713-724.

Yardley, L., Gardner, M., Lavie, N., & Gresty, M. (1999). Attentional demands of perception of passive self-motion in darkness. Neuropsychologia, 37, 1293-1301.

Yue, G. & Cole, K. J. (1992). Strength increases from the motor program: Comparison of training with maximal volontary and imagined muscle contractions. Journal of Neurophysiology, 67, 5, 1114-1123.

Zeil, J. (1998). Homing in fiddler crabs (Uca lactea annulipes and Uca vomeris: ocypodidae). Journal of Comparative Physiology A, 183, 367-377.

Résumé

La forme géométrique de ces déplacements locomoteurs complexes est régie par des contraintes environnementales (escalade, slalom de ski), esthétiques (danse, gymnastique), mécaniques (course d'élan du sauteur en hauteur) ou réglementaires. Ces contraintes contribuent à la constitution explicite ou implicite d'un modèle géométrique que le sujet aura pour charge de reproduire. Si l'on considère le déplacement comme la production d'une trajectoire du corps ayant une forme optimale en rapport avec certaines contraintes environnementales, la question se pose alors de savoir dans quelle mesure des modèles de trajectoires peuvent être reproduits par des sujets humains lors de la locomotion. L'objectif de ce travail est de mettre à jour quelques mécanismes d'ajustement de la forme des trajets locomoteurs par rapport à la forme des trajets proposés et de contribuer ainsi à mieux cerner les mécanismes de navigation dans l'espace bidimensionnel. Ce problème est en liaison étroite avec des données actuelles issues des sciences cognitives en général (psychologie, neurosciences, etc.) et trouve des applications certaines dans les activités physiques et artistiques qui nécessitent un guidage et un contrôle précis de la trajectoire du corps entier dans l'environnement. C'est évidemment le cas en escalade rocheuse ou sportive.

Dans un premier temps nous nous concentrons sur les données de la littérature qui représentent un support pour notre compréhension de la géométrie des trajets locomoteurs. Nous procédons en quatre étapes. Nous passons en revue certaines conceptions de la notion d'espace et insisterons sur le rôle de l'expérience sensible du sujet. Nous montrons que le fait de déplacer son corps entier dans l'espace est un problème de navigation qui peut être résolu selon différentes stratégies. Nous débouchons ensuite, chez l'homme, sur la production de trajets locomoteurs en envisageant certains modes de contrôle pour les trajets linéaires, en rotation ou dans l'espace bidimensionnel. Enfin, nous analysons les interactions entre les déplacements locomoteurs et les images mentales formées par le sujet qui les réalise.

Après ce chapitre théorique, nous consacrons deux chapitres à l'exposé du travail expérimental.
Le premier est très clairement consacré à la détermination des indices visuels nécessaires à la restitution fidèle d'un environnement mémorisé en escalade sportive (position des prises dans la voie). Cette question, constitue un point essentiel, en particulier lorsqu'il s'agit d'analyser une voie et d'en estimer la difficulté avant de grimper ou en phase d'isolement.
Le second chapitre est consacré à l'étude des mécanismes d'apprentissage de la forme du trajet et du rôle de sa géométrie. Dans une tâche de marche sur un trajet hexagonal, nous cherchons à identifier les incidences d'une activité préalable de simulation du déplacement sur la précision de la reproduction. De plus nous cherchons à clarifier la question du traitement par le sujet des aspects géométriques du modèle en effectuant certaines modifications spécifiques des angles et des distances.

Enfin, nous reprenons le texte d'un article scientifique actuellement sous presse pour la revue "Cognitive Brain Research". Cet article expose, de façon synthétique, l'intérêt de la simulation mentale de trajets locomoteurs préalablement observés pour pouvoir en restituer fidèlement la forme.

Des discussions sont présentées en fin de chapitre. Elles synthétisent les principaux résultats obtenus, relient notre contribution expérimentale avec les connaissances actuelles sur les déplacements locomoteurs et tracent quelques perspectives concernant le contrôle des trajectoires locomotrices en liaison avec la perception de l'espace et les contraintes motrices et cognitives auxquelles le sujet doit faire face lors de ses déplacements.