



HAL
open science

Influence des informations sensorimotrices sur les représentations de l'espace.

Simon Lhuillier

► **To cite this version:**

Simon Lhuillier. Influence des informations sensorimotrices sur les représentations de l'espace. : Approche située et incarnée de la mémoire spatiale. Psychologie. Université de Paris, 2019. Français. NNT: . tel-02400003

HAL Id: tel-02400003

<https://theses.hal.science/tel-02400003>

Submitted on 9 Dec 2019

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



Université de Paris

Ecole Doctorale 261 3CH (« Cognition, Comportements, Conduites Humaines »)

Laboratoire Mémoire, Cerveau et Cognition (LMC²)

Influence des informations sensorimotrices sur les représentations de l'espace

Approche située et incarnée de la mémoire spatiale

Par **Simon Lhuillier**

Thèse pour obtenir le grade de docteur

Spécialité : **Psychologie**

Dirigée par **Serge Nicolas** et **Valérie Gyselinck**

Présentée et soutenue publiquement le **29 Novembre 2019**

Devant un jury composé de :

Yann COELLO	Professeur – Université de Lille	Rapporteur
Michel GUERRAZ	Professeur – Université Savoie-Mont-Blanc	Examineur
Valérie GYSELINCK	Directrice de Recherche - IFSTTAR	Co-Directrice
Serge NICOLAS	Professeur – Université de Paris	Directeur
Francesca PAZZAGLIA	Professeur – Université de Padoue	Rapporteur



Except where otherwise noted, this is work licensed under <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Remerciements

Mes remerciements pour cette thèse sont dirigés à tous ceux qui ont contribué à la qualité de ce travail en particulier, mais aussi et surtout à ceux qui me communiquent l'envie et le courage de toujours chercher à devenir meilleur au quotidien. D'ordinaire « plutôt réservé », je vais pourtant tenter ici de vous rendre autant hommage que vous le méritez ; je vous demande simplement de me pardonner si ces mots sont maladroits ou si je ne peux tous vous citer.

Je souhaite diriger mes premiers remerciements à tous les enseignants que j'ai pu croiser et qui m'ont transmis la passion pour la recherche et la pédagogie. Mes pensées sont dirigées vers ceux qui ont cru en moi au cours de ma scolarité et m'ont donné la motivation et les moyens de poursuivre, en particulier Gilles Chevalier, Dorine Vergilino-Perez, Nicole Fiori-Duharcourt et bien entendu Serge Nicolas.

Serge, vous êtes l'une des raisons pour lesquelles j'aime notre métier. Votre humilité et votre empathie est un modèle que chacun devrait suivre, et vous n'avez cessé de m'inspirer à chacun de nos échanges. Vous avez beaucoup contribué (peut-être sans le savoir...) à l'évolution de ma pensée, et je m'estime extrêmement chanceux de vous compter parmi mes mentors...

...ce qui m'amène bien entendu à vous, Valérie. Voilà déjà plus de cinq ans que vous me torturez intellectuellement à la moindre virgule... Et j'en suis très heureux. Vous avez énormément travaillé pour m'aider à progresser et avez toujours su m'écouter avec la sensibilité et la sagesse qui vous caractérise. Travailler avec vous est incroyablement stimulant: vous attisez ma curiosité, m'offrez des défis intellectuels et m'accordez une confiance que je n'aurais jamais pensé mériter. Merci pour tout. Et merci à vous deux, Serge et Valérie, pour votre encadrement exceptionnel au cours de cette thèse en particulier, qui aurait sans doute été de bien piètre qualité sans votre travail et vos conseils avisés (finalement, je ne sais plus qui d'entre vous joue le « good cop » et qui joue le « bad cop »...).

J'aimerais remercier tous les membres du laboratoire Mémoire, Cerveau et Cognition (présents ou passés) pour leur soutien et pour m'avoir permis de travailler dans des conditions idéales. Je souhaite particulièrement remercier Pascale Piolino pour m'avoir chaleureusement accueilli dans sa structure, et m'avoir accordé tous les moyens nécessaires à la réalisation de mon travail, dans le contexte dynamique d'un laboratoire de qualité. Merci beaucoup à Frédérick de s'être plié en quatre pour me faciliter la vie (« who's with me ?! ») et Alexandre pour m'avoir prêté main forte à de nombreuses reprises.

Je tiens spécialement à remercier Léo et Elise, qui ont été des figures importantes dans ma formation alors que j'arrivais dans le monde de la recherche. J'espère avoir de nombreuses occasions d'échanger plus activement avec vous par la suite. Elise, c'est avec grand plaisir que j'envisage l'idée de travailler à nouveau avec toi très bientôt.

Je souhaite également remercier les membres du service d'enseignement de Psychologie Cognitive Expérimentale, et en particulier Karine Doré-Mazars, pour m'avoir donné l'opportunité d'enseigner et d'accumuler des expériences pédagogiques enrichissantes au cours de ces trois dernières années. Je tiens à remercier tous les étudiants ayant donné de

leur temps (et de leur énergie...) pour participer aux études de cette thèse, ainsi bien sûr que les étudiants à qui j'ai eu le plaisir d'enseigner au cours de ces trois ans !

Je remercie les membres du jury, Francesca Pazzaglia, Yann Coello et Michel Guerraz, qui ont accepté de consacrer une large portion de leur temps afin d'expertiser mon travail et de me faire l'honneur de participer à la soutenance de cette thèse.

Je souhaite remercier les personnes intervenant dans l'ANR WildTimes, et en particulier Virginie Van Wassenhove et Simone Morgagni pour m'accueillir dans leur projet. Il me tarde de commencer à décortiquer le temps et l'espace avec vous. Je souhaite également remercier les membres du LaPEA et en particulier Franck Zenasni pour m'offrir l'opportunité de participer à vos projets pédagogiques innovants.

Je voudrais maintenant prendre le temps de remercier mes proches, et vous demander pardon de ne pas le faire plus souvent. Vous m'avez tous aidé d'une façon ou d'une autre, principalement en me donnant toujours plus de raisons d'apprécier chaque instant pour aller toujours de l'avant. Vous êtes peu nombreux, parce que vous êtes tous des humains exceptionnels comme l'on en trouve que très rarement. Merci à ceux qui sont trop loin et dont j'aimerais qu'ils soient plus près : Romain, Laurie, et bien entendu Maxime (tu me manques). Merci à ceux qui sont plus près, mais pas assez : Jerémy, Myriam, Dylan... Et surtout, merci à vous deux, Thomas et Yannick : je ne m'explique toujours pas comment vous arrivez à supporter mes défauts tous les jours, tout en me donnant constamment l'impression d'être prêts à tous les sacrifices pour me soutenir. J'ai une confiance absolue en vous, et une chance inouïe de vous avoir dans ma vie, de pouvoir tous vous côtoyer. Merci à tous ceux que je n'ai pas cités mais qui se reconnaîtront, j'espère avoir la chance de pouvoir passer plus de temps en votre compagnie par la suite. J'ai une pensée particulière pour toi, Clément : tu sais que tu as toujours eu une place spéciale à mes yeux. Je regrette tous les jours que nous nous soyons éloignés. J'espère que tu es en sécurité où que tu te trouves actuellement, et que tu es en bonne santé. Tu nous manques.

Merci à ma famille, particulièrement Jocelyne, Laurine et David qui m'ont toujours supporté malgré la distance. Merci à vous, Myslène, Bruno et Alizée, pour votre affection et votre présence, depuis tant d'années. Merci à toi, Sam' : tu sais que je serai toujours à tes côtés quoi qu'il arrive.

Papa, Maman, je ne trouve pas les mots pour vous dire à quel point je vous suis redevable. Je veux que vous sachiez que tout ce que je fais, je le fais pour vous rendre fier. Vous m'avez tellement donné. Je vous admire, non pas parce que vous êtes mes parents, mais parce que vous m'avez prouvé à de maintes reprises que vous étiez de fantastiques personnes.

Enfin, il ne me reste qu'une seule personne à remercier. Tous ceux qui ont la chance de la connaître savent que rien de tout ceci n'existerait si elle n'était pas là. Amandine, mon étoile. Tu es la raison pour laquelle j'existe, tu donnes du sens à tout ce qui est. Cette thèse t'est dédiée, ainsi que tout ce que j'ai pu réaliser, et que je projette de réaliser. Je t'aime.

Merci.

Résumé

L'objectif de cette thèse est de mieux comprendre comment les informations sensorimotrices participent à la représentation d'un lieu en mémoire, et en influence les propriétés métriques. Notre hypothèse est que les informations issues du corps contribuent spécifiquement à ajuster les propriétés métriques de la représentation spatiale, c'est-à-dire à moduler la valeur des angles et distances mémorisés entre différents points de repères issus de l'environnement. Nous choisissons d'adopter une perspective située et incarnée, visant à promouvoir la synthèse de modèles théoriques écologiques afin d'aboutir à une meilleure connaissance des processus impliqués dans la mémoire spatiale. Afin d'appuyer notre vision intégrative des représentations spatiales, nous avons imaginé plusieurs protocoles impliquant un apprentissage spatial dans lequel les informations sensorimotrices pouvaient être rendues disponibles ou altérées, et nous avons observé les conséquences de ces manipulations sur des tâches variées dont le rappel de coordonnées spatiales sur carte. Nos résultats mettent en lumière les effets de processus d'anticipation d'effort physique liés à la locomotion sur l'encodage des propriétés métriques d'un lieu à grande échelle. Ils apportent également des données nouvelles concernant la perception des capacités d'action dans un espace péri-personnel, et son effet sur les propriétés de la représentation spatiale. Les implications théoriques de ce travail mettent l'accent sur la dépendance du format de représentation final aux demandes de la tâche effectuée durant l'encodage : à une activité et un but donné correspondrait une forme de représentation adaptée aux besoins de l'organisme en interaction avec un espace spécifique.

Mots-clés: mémoire spatiale, représentations spatiales, cognition située et incarnée, informations sensori-motrices, réalité virtuelle, propriétés métriques

Abstract

This Ph.D thesis aims to provide a better understanding of how sensorimotor information contributes to the representation of a place in memory, and influences its metric properties. Our hypothesis is that body-related information specifically contributes to adjusting the metric properties of the spatial representation, by modulating the values of inter-locations angles and distances stored in memory. We choose to support an embodied and situated view, which promotes the integration of ecological theoretical models in order to assemble better knowledge about spatial memory mechanisms. In order to support our integrative view on spatial representations, we imagined several research protocols involving spatial learning in which sensorimotor information could have been made available or altered, and we observed the consequences of these manipulations on various tasks including the recall of spatial coordinates on the map. Our results emphasize the effect of physical effort anticipation processes linked with locomotion on the encoding of large-scale spatial metric properties. They also provide new elements in regards to action capabilities perception in a peripersonal space, and its effect on the properties of spatial representations. Theoretical implications of this work underline how the parameters of the representations are dependent task demands during encoding: activities and goals shape the representation depending on the needs of the body, in interaction with a specific context.

Keywords: spatial memory, spatial representations, embodied and situated cognition, sensorimotor information, virtual reality, metric properties

Table des Matières

1. INTRODUCTION GENERALE	21
1.1. CONSIDERATIONS HISTORIQUES SUR LA MEMOIRE, L'ESPACE ET LA TOPOLOGIE DE L'ESPRIT	23
1.2. PRESENTATION DE LA THESE.....	27
2. LA REPRESENTATION SPATIALE : EVOLUTIONS DES DIFFERENTES APPROCHES THEORIQUES	31
2.1. MODELES CLASSIQUES COMPUTATIONNELS DE LA REPRESENTATION SPATIALE : CARTES COGNITIVES OU SCHEMAS TOPOLOGIQUES ?	33
2.1.1. <i>Le concept de carte cognitive</i>	35
2.1.1.1. Travaux princeps et premières réflexions en éthologie.....	35
2.1.1.2. Les cellules de lieu.....	36
2.1.1.3. Les cartes cognitives chez l'humain	38
2.1.2. <i>Arguments empiriques et évolutions de la carte cognitive</i>	40
2.1.2.1. Distorsions des propriétés métriques en mémoire	40
2.1.2.2. De la carte cognitive au « schéma cognitif ».....	42
2.1.3. <i>Modèles Mixtes et Modèles Mentaux</i>	44
2.1.3.1. Modèles mixtes : topologiques et métriques	44
2.1.3.2. Le Modèle Mental : une rupture conceptuelle	47
2.1.4. <i>En résumé : cartes et schémas, métaphores trop restrictives</i>	50
2.2. APPROCHES ECOLOGIQUES DE LA COGNITION.....	53
2.2.1. <i>Les théories de la cognition située et incarnée</i>	54
2.2.1.1. De la nature des représentations	54
2.2.1.2. Cognition « située » et extensions cognitives	58
2.2.1.3. Cognition « incarnée » et mémoire pour l'action	60
2.2.1.4. La simulation sensorimotrice : arguments empiriques	62
2.2.1.5. Les théories de l'énaction	65
2.2.2. <i>Une approche située et incarnée de la représentation spatiale</i>	67
2.2.2.1. Le corps comme référentiel de la représentation	67
2.2.2.2. La métaphore des collages spatiaux de Tversky	70
2.2.3. <i>Différents espaces, différents formats de représentation ?</i>	72
2.2.3.1. Le modèle mental spatial.....	72
2.2.3.2. Une question de perspective(s) ?	73
2.2.3.2. Une question d'échelle(s) ?	75
2.2.4. <i>En résumé : la cognition au service du corps, entre réductionnisme et complexification du réel</i>	78
2.3. CONTRIBUTION SPECIFIQUE DES INFORMATIONS SENSORIMOTRICES A LA PERCEPTION ET AUX REPRESENTATIONS DE L'ESPACE.....	81
2.3.1. <i>Catégorisation spatiale et représentations sensorimotrices</i>	81
2.3.1.1. Le modèle de Coello & Delevoeye-Turrell	81

2.3.1.2.	L'approche « action-specific » et l'économie de l'action.....	84
2.3.2.	<i>Apprentissage spatial actif/passif</i>	86
2.3.2.1.	Définitions et activité idiothétique	86
2.3.2.2.	Contribution des informations podokinétiques.....	88
2.3.2.3.	Représentation multimodale ou activité physiologique ?.....	91
•	Question de recherche: Etude 1 de la thèse.....	92
2.3.3.	<i>Imagerie mentale motrice et simulation sensorimotrice podokinétique</i>	93
2.3.3.1.	Paramètres de la marche imaginée	93
2.3.3.1.	Simulation sensorimotrice podokinétique durant l'encodage d'un matériel spatial	96
•	Question de recherche: Etude 2 de la thèse.....	97
2.3.4.	<i>L'effort physique comme modulateur des propriétés métriques de la représentation spatiale ?</i>	99
2.3.4.1.	Recalibration de l'effort et perception des distances	99
2.3.4.1.	Le « distance-on-hill » effect	102
•	Question de recherche: Etude 3 de la thèse.....	104
2.3.5.	<i>Influence des effets de capacités d'action sur le matériel spatial</i>	106
2.3.5.1.	Capacités d'actions dans l'espace péri-personnel.....	106
2.3.5.2.	Performances et biais métriques en mémoire	108
2.3.5.5.	Accessibilité, gestes et mémoire	109
•	Question de recherche: Etude 4 de la thèse.....	112
2.3.6.	<i>En résumé : contribution des informations sensorimotrices, paradoxes et variabilité(s)</i>	113

3. ETUDE 1 : EFFET FACILITATEUR DE LA LOCOMOTION SUR L'ENCODAGE DE REPRESENTATIONS SPATIALES 119

3.1.	OBJECTIFS	119
3.2.	ARTICLE 1	121
3.2.1.	<i>Introduction</i>	122
3.2.1.1.	Active spatial learning.....	122
3.2.1.2.	Task-dependent effects of podokinetic information availability.	124
3.2.2.	<i>Méthode</i>	126
3.2.2.1.	Participants.....	126
3.2.2.2.	Material	126
3.2.2.3.	Design and procedure.....	131
3.2.2.4.	Statistical Analyses	133
3.2.3.	<i>Résultats</i>	134
3.2.4.	<i>Discussion</i>	139
3.3.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	144

**4. ETUDE 2 : AUGMENTER LA SENSATION D'EFFORT PHYSIQUE DE LA LOCOMOTION
AVANT L'ENCODAGE ALTERE LES PERFORMANCES SPATIALES..... 147**

4.1.	OBJECTIFS	147
4.2.	ARTICLE 2	149
4.2.1.	<i>Introduction</i>	150
4.2.1.1.	The integration of podokinetic information during spatial learning	150
4.2.1.2.	Motor simulation and podokinetic effort	152
4.2.1.3.	Route planning: a complex real-life task in a large-scale environment	154
4.2.1.4.	Aims of the study	155
4.2.2.	<i>Méthode</i>	156
4.2.2.1.	Participants.....	156
4.2.2.2.	Material	157
4.2.2.3.	Procedure.....	159
4.2.3.	<i>Résultats</i>	161
4.2.4.	<i>Discussion</i>	165
4.3.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	171

**5. ETUDE 3 : EFFET D'UN BIAIS D'ANTICIPATION D'EFFORT PHYSIQUE DE LA
LOCOMOTION SUR LES PROPRIETES METRIQUES DE LA REPRESENTATION SPATIALE 173**

5.1.	OBJECTIFS	173
5.2.	ARTICLE 3	177
5.3.	EXPERIENCE 1 : INVERSION DU DISTANCE-ON-HILL EFFECT EN MEMOIRE LORS DE LA LOCOMOTION ACTIVE AVEC EFFORT PHYSIQUE MAINTENU CONSTANT.....	178
5.3.1.	<i>Introduction</i>	178
5.3.1.1.	Embodied and situated spatial cognition.....	178
5.3.1.2.	Action specific effects.....	179
5.3.1.3.	Goals of the present study and hypotheses	182
5.3.2.	<i>Method and Material</i>	183
5.3.2.1.	Participants.....	183
5.3.2.2.	Material	183
5.3.2.3.	Procedure.....	189
5.3.3.	<i>Résultats</i>	192
5.3.4.	<i>Discussion (expérience 1)</i>	196
5.4.	EXPERIENCE 2 : SUPPRESSION DU DISTANCE-ON-HILL EFFECT EN MEMOIRE PAR L' AUGMENTATION DU COUT ENERGETIQUE REEL.....	200
5.4.1.	<i>Méthode</i>	200
5.4.1.1.	Participants.....	200
5.4.1.2.	Matériel	200
5.4.1.3.	Procédure.....	200

5.4.2.	Résultats.....	201
5.4.3.	Discussion (expérience 2).....	204
5.4.4.	Discussion Générale.....	205
5.5.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	209
6.	ETUDE 4 : LES INTERACTIONS DANS L'ESPACE PERI-PERSONNEL ENTRAINENT DES BIAIS D'ENCODAGE DES PROPRIETES METRIQUES LIES A LA CAPACITE D'ACTION.....	213
6.1.	OBJECTIFS.....	213
6.2.	ARTICLE 4.....	217
6.2.1.	Introduction.....	218
6.2.1.1.	Goal-directed perception and cognition.....	218
6.2.1.2.	Embodied spatial cognition: different spaces, different actions.....	219
6.2.2.	Méthode.....	221
6.2.2.1.	Participants.....	221
6.2.2.2.	Material.....	222
6.2.2.3.	Design and Procedure.....	224
6.2.3.	Résultats.....	226
6.2.4.	Discussion.....	232
6.3.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	236
7.	SYNTHESE DE LA PARTIE EXPERIMENTALE.....	239
7.1.	LES INFORMATIONS PODOKINETIQUES CONTRIBUENT-ELLES A LA CONSTRUCTION DE LA REPRESENTATION SPATIALE EN MEMOIRE ?.....	239
7.2.	EST-IL POSSIBLE D'OBSERVER LES EFFETS D'UN PROCESSUS DE RECALIBRAGE IMPLICITE DE LA SIMULATION SENSORIMOTRICE SUR LA REPRESENTATION SPATIALE ?.....	241
7.3.	LE DISTANCE-ON-HILL EFFECT POURRAIT-IL ETRE OBSERVE DEPUIS LA MEMOIRE, APRES UN APPRENTISSAGE SPATIAL COMPLEXE ET ACTIF ?.....	243
7.4.	L'ACTIVITE MOTRICE LIEE AUX ACTIONS EFFECTUEES DANS L'ESPACE PERI-PERSONNEL INFLUENCE-ELLE LES PROPRIETES DE LA REPRESENTATION SPATIALE DE L'ESPACE EXTRA-PERSONNEL ?.....	244
8.	DISCUSSION GENERALE.....	247
8.1.	PROPOS SUR LE CARACTERE ECOLOGIQUE DE LA THESE.....	247
8.1.1.	De l'usage de la réalité virtuelle.....	247
8.1.1.1.	Réalisme, immersion et présence.....	247
8.1.1.2.	Contrôle expérimental et reproductibilité.....	249
8.1.1.3.	Transgressions locales.....	251
8.1.1.4.	Exemples de perspectives appliquées.....	253
8.2.	VERS UNE APPROCHE INTEGRATIVE DES REPRESENTATIONS SPATIALES.....	257
8.2.1.	Flexibilité représentationnelle : perspectives route et survol.....	259

8.2.2. <i>Formats et valeur fonctionnelle des représentations spatiales</i>	264
8.2.3. <i>Le rôle de la simulation : limites et ouvertures</i>	268
8.2.4. <i>De la géométrie des espaces mentaux</i>	270
8.2.5. <i>En conclusion : la nécessité d'une approche centrée sur la tâche</i>	272
9. BIBLIOGRAPHIE	275
10. ANNEXES	323

PARTIE THEORIQUE

1. INTRODUCTION GENERALE

Depuis l'Antiquité la mémoire a été découpée et structurée comme une entité spatialisée, un *palais mental* dans lequel seraient rangées nos expériences. Dans la première partie de cette introduction, nous évoquerons comment les grands penseurs ont intuitivement défini la mémoire en ayant recours à la métaphore spatiale. Cette propension à spatialiser la mémoire illustre l'importance que revêt cette dimension chez l'humain, évoluant invariablement dans le contexte d'un environnement physique.

Nous présenterons différentes approches de l'*espace psychologique*, une notion extraite de la littérature philosophique ayant précédé le concept de représentation mentale propre aux sciences cognitives. Nous nous intéresserons ensuite aux premiers auteurs ayant discuté le rôle prépondérant du corps et des stimulations sensorimotrices dans la construction de cet espace psychologique.

Dans la seconde partie de cette introduction générale, nous aborderons les thématiques de la présente thèse et le questionnement général ayant mené à l'élaboration de la revue de littérature scientifique. Nous présenterons les différentes parties qui seront abordées par la suite dans cette revue de littérature traitant des modèles de la représentation spatiale et leurs évolutions.

1.1. CONSIDERATIONS HISTORIQUES SUR LA MEMOIRE, L'ESPACE ET LA TOPOLOGIE DE L'ESPRIT

« *Et j'arrive aux grands espaces et aux vastes palais de la mémoire, où se trouvent les trésors des innombrables images apportées par la perception de toutes sortes d'objets* ». Saint Augustin (354-430), en comparant la mémoire à un lieu physique (Confessions, Livre X, Chap. VII), perpétue une pensée héritée de l'Antiquité : la mémoire est un lieu mental, organisé selon des subdivisions fonctionnelles de sorte que tout y entre par des voies préétablies et s'y range de manière ordonnée (Saint-Augustin, 1964¹). Aristote (384 av. J.C - 322 av. J.C) affirmait déjà que personne ne pouvait apprendre sans manipuler des images par l'esprit, et que la mémoire était donc une collection d'images mentales dérivées des impressions des sens (Yates, 1966, p. 33). Il ajoute également que le souvenir des choses est lui-même causé par la simple évocation de leur « *endroit* » (τόπος, *topos* en grec), correspondant au « lieu », au contexte spatial lors de la création du souvenir. Au-delà de ces exemples explicites, il est courant dans l'histoire de la philosophie que les auteurs cherchant à comprendre le fonctionnement de la mémoire aient recours à la métaphore de l'espace pour la décrire. Il existerait une analogie intuitive entre espace mental, et espace physique. Profitant de cette analogie et perpétuant les doctrines aristotéliennes, Saint Thomas d'Aquin (1224-1274) formule des préceptes visant à utiliser correctement sa mémoire, dont l'une des règles est : il faut *disposer* ces choses dont nous souhaitons nous souvenir dans un certain ordre, afin que la progression d'une chose à la suivante soit facilement établie (Yates, 1966, p.75). Ce principe est en fait lié à une longue tradition de pratiques mnémotechniques, illustrant parfaitement comment la visualisation de la mémoire sous la forme d'un lieu aide à son fonctionnement.

Dès le V^{ème} siècle avant J.C, le poète grec Simonide de Céos (556 av. J.C-468 av. J.C) parvient à se souvenir du placement de tous les convives lors d'un immense banquet. C'est un mnémotechnicien, un « expert » de la mémoire, et sa méthode est la méthode des lieux. Cette méthode mnémotechnique connue également sous le nom de « technique du palais mental » (J. D. Spence, 1984), consiste traditionnellement à parcourir mentalement un endroit familier tout en y « déposant » les éléments d'une liste à mémoriser (typiquement, les points clés d'un discours ou une liste de courses). Il s'agit ensuite de s'imaginer re-parcourir cet endroit pour

¹ Saint-Augustin. (1964). *Les confessions. Traduction française par J. Trabucco*. Tours: Garnier-Flammarion (Ouvrage original publié entre 397 et 401).

rappeler les éléments au fur et à mesure qu'ils sont rencontrés. Selon Quintilien (35-100), tous les détails qu'il faut rappeler sont ainsi liés les uns aux autres et « celui qui suit ne peut pas divaguer par rapport à celui qui précède et auquel il est lié » (Eustache & Desgranges, 2015, p. 18), insistant ainsi sur l'importance de la progression en mouvement dans cet espace mental. L'utilisation convenable de la méthode des lieux augmente donc les performances de mémorisation, et ce notamment car elle permet de se servir d'une représentation interne de l'espace pour organiser convenablement le « stockage interne de la mémoire » (Eustache & Desgranges, 2015). Ainsi, étayer la mémoire non spatiale par la représentation d'un lieu aide à structurer l'information, et Frances Yates dans son ouvrage « L'art de la mémoire » ne manque pas de souligner que le « topos » d'Aristote est en fait une évocation directe de ce lieu (*locus*) dans lequel l'information est « rangée » chez les mnémotechniciens (Yates, 1966).

Si la dimension spatiale aide au fonctionnement de la mémoire en général, c'est surtout parce que l'espace revêt une importance particulière pour tout être vivant : il « s'impose à chacun comme une réalité intuitive qui fournit un contexte pour une variété d'expériences sensorielles et locomotrices » (Denis, 2018, p. 5). Il semble donc pertinent de s'imaginer que le contexte dans lequel nous évoluons influence la structure de nos opérations mentales. C'est d'ailleurs Emmanuel Kant (1724-1804) qui formalisera encore plus radicalement cette idée dans sa *Critique de la raison pure* :

L'espace ne représente nulle propriété de quelconques choses en soi, ni ces choses dans la relation qu'elles entretiennent les unes avec les autres, [...] l'espace n'est rien d'autre que simplement la forme de tous les phénomènes des sens externes, c'est-à-dire la condition subjective sous laquelle seulement pour nous une intuition externe est possible » (Kant, 1781) [Traduction française par J. Auxenfants, 2019].

Kant définit donc l'espace comme un principe organisateur inné de l'esprit, une « façon » de percevoir et non un objet pouvant être perçu, d'après l'analyse de John O'Keefe et Lynn Nadel sur le sujet (1978). Toutefois l'objet d'étude de Kant est la *raison* et non l'espace en tant qu'objet physique.

Il est alors intéressant de noter que la plupart des physiciens s'intéressant à définir l'espace physique se sont également attachés à décrire les propriétés de l'espace mental, comme si l'un ne pouvait être compris sans l'autre. Ainsi de nombreux auteurs se sont

questionnés sur la nature de l'*espace psychologique*, défini comme un espace attribué au sein de l'esprit, soit comme un aspect intrinsèque, soit comme un produit inévitable ou hautement probable des opérations normales de l'esprit (O'Keefe & Nadel, 1978, p. 6). Cet espace psychologique comprend les *loci* utilisés par les mnémotechniciens, mais concerne également les concepts, ce qui le rapproche de la notion de *représentation* que nous discuterons au long de cette thèse. Par exemple, Newton (1642-1727) définit l'espace physique comme un cadre absolu et immuable contenant la matière, mais admet que seul l'espace *psychologique* est lui relatif à l'expérience personnelle. Par cela il s'oppose à la philosophie antique et à ses héritiers en rejetant l'analogie entre espace physique et espace psychologique : ce sont deux espaces régis par des lois différentes (Newton, 1687). Nous verrons par la suite que cette question de l'analogie entre les propriétés physiques du lieu et sa trace mnésique dans l'esprit constitue un axe de recherche central dans le champ de la future psychologie cognitive. De plus, Newton considère l'espace physique comme suivant les lois de la géométrie euclidienne (géométrie classique décrivant les propriétés des figures sur un plan) mais ne se prononce pas sur la géométrie de l'espace psychologique. Le relativisme de l'espace psychologique selon Newton se traduit par le fait que celui-ci se construit en calculant les positions des objets les uns par rapport aux autres, mais en supposant tout de même l'existence d'un point de référence stable, un cadre *inertiel* (Newton, 1687).

Leibniz (1646-1716) pour sa part rejette totalement l'idée d'un espace physique absolu puisque celui-ci ne pourrait exister sans matière : par conséquent l'esprit ne pourrait concevoir un espace dénué d'objets. Pour lui, les deux espaces sont relatifs et continus (Leibniz, 1704²). Cette conception fut l'un des fondements princeps sur lequel s'étayera la formulation de la théorie de la relativité générale (Einstein, 1920). Un autre de ces fondements concerne les travaux du célèbre mathématicien français Henri Poincaré (1854-1912), qui s'attacha à décrire les propriétés de l'espace « géométrique » : infini, continu, homogène, tridimensionnel et isotrope (qui conserve ses propriétés dans toutes les directions). Selon lui, le choix d'une géométrie euclidienne ou non-euclidienne pour l'espace est une convention, qui ne l'intéresse guère puisqu'il considère l'espace uniquement par le mouvement. Intéressé par la question de l'espace psychologique (ou espace *représentatif* selon ses termes), Poincaré développe un

² Leibniz, G. W. (1994). *New essays on human understanding. English traduction by P. Remnant and J. Bennett.* Cambridge: Cambridge University Press. (ouvrage original rédigé en 1704, publié en 1765)

aspect d'importance primordiale pour la suite de la présente thèse : il inclut dans sa construction un rôle prépondérant du corps.

Pour Poincaré, les propriétés de l'espace géométrique sont déformées dans l'esprit, car la sensation d'espace ne peut être obtenue qu'à travers un seul instrument, le corps. Ainsi le point de référence à tout espace mental est le corps (« nous ne pouvons cesser de voir, ou tout du moins de sentir, notre corps et nos membres [...] qui continuent à nous servir d'instruments de mesure », Poincaré, 1914, p. 106), et une distance à un objet correspond aux « mouvements qu'il faut faire pour atteindre cet objet » (Poincaré, 1902, p. 75). Toutefois Poincaré n'a pas été le premier à définir l'espace représentatif en ces termes. George Berkeley (1685-1753), dans son essai sur la vision, défend l'idée que la perspective ne pouvant être fidèlement représentée par une image bidimensionnelle sur la rétine, devait être reconstruite par le biais d'expériences empiriques liées à la sensation tactile :

I believe whoever will look narrowly into his own Thoughts, and examin what he means by saying, he sees this, or that thing at a Distance, will agree with me that, what he sees only suggests to his Understanding, that after having passed a certain Distance, to be measur'd by the Motion of his Body, which is perceivable by Touch, he shall come to perceive such, and such Tangible Ideas which have been usually connected with such and such Visible Ideas³ (Berkeley, édité par Wilkins, 2002, p. 13, ouvrage original publié en 1709).

Ainsi Berkeley en vient-il à définir l'espace psychologique avec une brillante simplicité : prenez les endroits dans lesquels votre corps se voit opposer le moins de résistance, appelez cela l'espace ; calculez la quantité de mouvements entre deux sensations, appelez cela la distance (Berkeley, 1709/2002). Malgré l'étonnante efficacité didactique de cette approche naturaliste de l'espace, le rôle du corps dans la construction de l'espace psychologique sera par la suite longtemps mis de côté, au détriment d'approches idéalistes dites transcendantales dans lesquelles la perception est reléguée au second plan, supplantée par la raison (Kant, Schopenhauer ou encore Husserl).

Historiquement, la façon dont l'humain se représente mentalement l'espace a donc été investiguée par le biais de l'introspection, méthode reine de la philosophie rationaliste. Selon

³ « Et je crois que quiconque regardera attentivement dans ses pensées et examinera ce qu'il comprend en disant qu'il voit telle chose à telle distance, conviendra que ce qu'il voit suggère simplement à sa compréhension qu'après avoir passé une certaine distance, mesurée par le mouvement de son corps, perceptible par le toucher, il en viendra à percevoir une idée tangible habituellement connectée à une idée visible » [traduction libre]

la doctrine rationaliste initiée par René Descartes (1596-1650), l'esprit est le seul outil et la seule preuve de l'existence d'une réalité (penser, c'est prouver que l'on existe). Malgré quelques exceptions (pour Berkeley : être, c'est être perçu ou percevoir), la philosophie rationaliste a contribué à l'installation d'une tradition dualiste prônant la séparation du corps et l'esprit, l'esprit étant considéré comme une entité « vraie », le reste n'étant que conjectures. Bien que l'introspection ait été rejetée par les prémices de la méthode scientifique, notamment sous l'impulsion d'Auguste Comte (1798-1857) et du *positivisme* (« *il est impossible de s'observer soi-même* », Comte, 1830, 1852), elle persista jusqu'à l'avènement de la psychologie empirique. Wilhelm Wundt (1832-1920) lui-même, fondateur de la psychologie expérimentale institutionnalisée et partisan de l'utilisation des méthodes psychophysiques et psychométriques (Nicolas, 2016), adopte une posture ambiguë en déclarant : « *toute psychologie commence par l'introspection* » (Lecadet & Mehanna, 2006). Cependant, à partir du XX^{ème} siècle et notamment à la suite des travaux expérimentaux d'Ebbinghaus (1850-1909) sur la mémoire, la méthode scientifique commence à s'installer progressivement afin de déconstruire la barrière hermétique instaurée entre l'esprit et le corps par la tradition rationaliste et spiritualiste. Les questionnements sur la nature de la mémoire reprennent donc, laissant de côté l'introspection pour enfin adopter l'observation empirique et systématique des comportements comme source de production de connaissances vérifiables et contrôlées. Avec l'avènement des sciences cognitives seront formulés les premiers modèles scientifiques de l'organisation de la mémoire sous forme de représentations, mais aussi et surtout de cette forme particulière de représentation héritée de l'espace psychologique : la représentation spatiale.

1.2. PRESENTATION DE LA THESE

Les sciences cognitives ont pour objet « *l'analyse scientifique moderne de l'esprit et de la connaissance sous toutes ses dimensions* » (Varela, 1989, p. 9). Parmi ces dimensions se trouve le concept central de « représentation ». Selon Jean-François Le Ny, une représentation est un « *fragment d'information structurée, stockée, existant en principe dans la mémoire d'un sujet ; les percepts, les significations des mots, les notions ou concepts, les connaissances, sont des classes de représentations* » (Le Ny, 1989). Au niveau physiologique, la représentation est globalement définie à partir de la théorie des assemblées neuronales de Donald Hebb (1904-1985), qui stipule que chaque couple ou système de cellules qui sont répétitivement actives au même moment tendent à devenir associées (Hebb, 1949). Ainsi une

représentation sera sous-tendue dans le cerveau par l'activation d'une assemblée neuronale responsable de l'émergence d'un concept à la conscience depuis la mémoire (Lashley, 1950), aussi connue sous le nom d'engramme. Le point commun entre les définitions cognitivistes ou physiologiques de la représentation est que dans les deux cas, une représentation peut être assimilée à une unité de savoir structurée dans le cerveau/l'esprit sous la forme d'un système.

La représentation cognitive possède tout de même une caractéristique primordiale par rapport aux assemblées neuronales : elle est intrinsèquement inobservable, ce qui implique que ses propriétés et caractéristiques ne peuvent être déduites qu'à partir de l'observation de ses phénomènes associés (dynamique du système nerveux central et/ou comportement et performances). Ceci explique pourquoi les sciences cognitives ont pour objectif de produire des modèles théoriques de la représentation, afin de fournir des cadres explicatifs permettant de comprendre comment s'organisent les connaissances. Ainsi, l'une des principales questions ayant animé la recherche en psychologie cognitive concerne la nature de la représentation, ainsi que ses aspects fonctionnels (Denis & Dubois, 1976). Cette question revêt une importance particulière à propos de la représentation spatiale : en dépit de l'importance particulière que possède l'espace dans le quotidien de l'humain et de son fonctionnement mental, il s'agit d'une notion et d'un objet infiniment complexe à décrire et définir. Or la compréhension de la nature des représentations spatiales est l'un des thèmes d'étude centraux dans le domaine de la cognition spatiale : « *la cognition spatiale est la connaissance des représentations internes ou cognitives de la structure, des entités et des relations de l'espace* » (Hart & Moore, 1973, trad. p. 248).

Dans l'ensemble de cette thèse, nous verrons que les représentations de l'espace en mémoire sont aussi complexes que leur objet, et qu'aucun modèle théorique décrivant la représentation spatiale n'est actuellement universellement admis. Ainsi, après avoir présenté les débats théoriques au sujet de la nature et du fonctionnement des représentations spatiales, nous nous attacherons à décrire des protocoles expérimentaux mis en place dans le cadre de ce travail, ayant pour but de réunir de nouvelles connaissances sur la question de la représentation de l'espace grâce à des méthodologies nouvelles à visée écologique.

A la suite de cette introduction générale seront donc présentés les différents questionnements ayant conduit à l'élaboration de modèles théoriques de la représentation spatiale. Dans un premier temps, l'approche dite computationnelle des représentations spatiales sera présentée, suivie de ses nombreuses évolutions. Cette partie s'articulera

principalement autour du concept de cartes cognitives, et se terminera par la présentation de modèles alternatifs tels que les schémas topologiques ou les modèles mentaux spatiaux.

Dans un second temps nous définirons les approches écologiques de la cognition, ayant pour but de s'intéresser au fonctionnement mental de l'humain en interaction avec des contextes environnementaux et des états du corps. Nous verrons ensuite comment les représentations spatiales peuvent être considérées selon ce type d'approche en prenant comme point d'ancrage la métaphore des collages spatiaux de Barbara Tversky. Nous verrons notamment comment cette vision intégrative des représentations spatiales semble pertinente pour rendre compte de la nature complexe et multidimensionnelle du traitement de la connaissance spatiale.

La dernière partie de notre introduction théorique sera consacrée à décrire comment les informations sensorimotrices peuvent participer au traitement perceptif et à la mémorisation de la connaissance spatiale. Il s'agira de présenter un grand nombre d'arguments expérimentaux nous permettant de penser que les informations issues du corps sont intégrées dans la représentation de l'espace en mémoire. Nous nous consacrerons ici plus particulièrement à décrire l'influence de l'information sensorimotrice issue de la marche lors de l'apprentissage de distances, mais aussi de lieux à grande échelle. La fin de cette partie sera dédiée aux informations sensorimotrices liées à la manipulation d'objets, afin de montrer comment la perception (et possiblement la mémoire) de l'espace immédiat est déformée par les possibilités d'actions.

La partie expérimentale de cette thèse sera ensuite divisée en quatre études, chacune d'entre elles traitant de l'influence des informations sensorimotrices sur les propriétés métriques (informations de distances et d'angles) de la représentation spatiale en mémoire. L'idée générale de ces manipulations expérimentales sera donc de mieux comprendre comment des variations d'activité motrice peuvent entraîner des déformations dans les propriétés métriques de la représentation spatiale. Ainsi les trois premières études viseront à améliorer l'état des connaissances sur la contribution des informations sensorimotrices liées à la marche lors de l'apprentissage de lieux complexes à grande échelle, et plus particulièrement concernant le moment de l'activité motrice, son coût énergétique physiquement ressenti et son coût énergétique anticipé. La quatrième étude de cette thèse aura pour but de montrer que l'influence des informations sensorimotrices sur les propriétés métriques de la représentation spatiale est potentiellement due au traitement de l'espace dirigé

vers l'action. Pour ce faire, nous observerons comment interagir physiquement avec des objets lors de l'apprentissage de positions spatiales influence les propriétés métriques globales de la représentation à travers une tâche de rappel de positions spatiales.

La discussion de cette thèse apportera une vision critique des observations effectuées au cours de la partie expérimentale, en soulignant notamment les apports et limites de la réalité virtuelle comme outil expérimental de l'étude du traitement de l'information spatiale. Nous nous attacherons plus particulièrement à décrire comment les résultats obtenus peuvent contribuer à une approche intégrative des représentations spatiales, mettant en avant la possible flexibilité représentationnelle de l'information spatiale en mémoire. Nous concluons cette thèse par une réflexion critique traitant des ouvertures de ce travail, notamment sur le plan théorique au sujet de la question de la simulation motrice, mais aussi sur le plan des enjeux appliqués potentiels.

2. LA REPRESENTATION SPATIALE : EVOLUTIONS DES DIFFERENTES APPROCHES THEORIQUES

Dans cette partie seront décrites les différentes contributions théoriques concernant la représentation spatiale, son format, et ses aspects fonctionnels. La première partie de cette revue de littérature sera dédiée aux travaux issus du courant cognitiviste computationnel dit « classique », notamment articulés autour du concept de « cartes cognitives ». Il s'agira alors de souligner le rôle décisif de ces réflexions princeps dans l'évolution du concept de représentation spatiale, avant d'en présenter les limites justifiant l'apparition de propositions théoriques alternatives.

Parmi les approches alternatives au cognitivisme computationnel, nous nous focaliserons spécifiquement sur les approches dites écologiques de la cognition. Ces approches partagent l'objectif de décrire la cognition dans son milieu environnemental, en interaction constante avec les stimuli externes. Au sein de ces approches se trouvent les théories du codage prédictif Bayésien et les théories de la cognition située et incarnée, que nous décrirons plus amplement dans une seconde partie.

La troisième partie de cet état de l'art sera consacrée à la contribution des informations sensorimotrices aux représentations spatiales, dans la continuité des théories de la cognition située et incarnée. Nous évoquerons les arguments empiriques en faveur de l'intégration d'informations liées au corps dans la construction des représentations spatiales. Nous présenterons également les limitations et critiques méthodologiques de ce type d'études, afin d'amorcer le questionnement et les hypothèses motivant la partie expérimentale de cette thèse.

2.1. MODELES CLASSIQUES COMPUTATIONNELS DE LA REPRESENTATION SPATIALE : CARTES COGNITIVES OU SCHEMAS TOPOLOGIQUES ?

La question de la représentation mentale, bien que transversale dans la philosophie et au début de la psychologie empiriste, a énormément pâti du behaviorisme entre les années 1920 et 1950. La psychologie behavioriste s'est construite sur le postulat que seuls les comportements peuvent être objectivement observés selon la méthode positiviste (Comte, 1852), et que les phénomènes internes liés à la pensée devraient donc être ignorés (Skinner, 1976). Ainsi les behavioristes visent à l'établissement de lois permettant de prédire le comportement réflexe à partir des stimuli extérieurs, rejetant totalement l'introspection (Watson, 1913). Parmi les méthodes employées par les behavioristes se trouve le conditionnement, dont toutes les variantes (Pavlov, 1927; Skinner, 1976) utilisent l'apprentissage d'une relation entre un stimulus et une réponse comportementale. Bien que les fondements empiriques de cette méthode soient louables, elle a également contribué à une certaine stagnation des connaissances dans le domaine de la mémoire et des représentations : Baars (1986), note que les ouvrages les plus influents traitant de l'apprentissage omettent tous le terme mémoire de leur index, et en conclut que le concept de mémoire a souffert sous le behaviorisme, en même temps que toutes les références à des états internes.

C'est notamment ce refus de théoriser l'état mental qui mènera la doctrine behavioriste à son terme, souffrant d'une « crise de paradigme » (Kuhn, 1972) causée par la pression vers le réductionnisme. Or, en parallèle des essais infructueux proposés par les behavioristes pour établir une théorie générale du comportement (Hull, 1952), de nouvelles idées ont émergé sur le fonctionnement mental : inspirés par le développement rapide des techniques informatiques, McCulloch et Pitts formulent pour la première fois l'idée d'une analogie entre les principes de la logique formelle et le fonctionnement du système nerveux central (McCulloch & Pitts, 1943). Il s'agit alors de trouver des réponses au fonctionnement de l'esprit humain dans ce que l'humain a construit, en assumant une certaine forme de « transmission » des processus mentaux dans le fonctionnement logique de la machine (selon les mots prononcés par le physicien Richard Feynman : « ce que je ne peux construire, je ne peux le comprendre »). C'est le début de l'approche computationnelle, visant à comprendre le fonctionnement mental comme un système de traitement de l'information, fer de lance de la « révolution cognitiviste » (Legrand, 1990).

La révolution cognitiviste se matérialise par l'émergence du paradigme cognitiviste dont le postulat général est que « notre esprit fonctionne selon des principes de calculs » (Haugeland, 1989). Ces principes computationnels s'illustrent dans un premier temps dans des domaines tels que la linguistique (Chomsky, 1957) puis dans les débuts de l'intelligence artificielle (Newell & Simon, 1972) avec un postulat unificateur puissant résumé par Jerry Fodor : l'esprit est modulaire, l'information est cloisonnée en systèmes spécialisés hermétiques les uns par rapport aux autres (Fodor, 1983) et organisés selon une taxonomie hiérarchique (Tulving, 1972). Cette hypothèse a deux conséquences immédiates : d'une part, elle suppose que le traitement cognitif « central » est totalement dissocié des processus perceptifs ou moteurs qui ne sont alors que des modules d'*input* et d'*output*, c'est-à-dire les périphériques d'entrée et de sortie du système (Fodor, 1983; Marr, 1982). D'autre part, cela suppose que les stimulations extérieures sont traduites sous un format logique permettant le traitement cognitif, ce qui implique donc une nature amodale des représentations (Andler, 1987). Par « format » nous entendons ici une structure de présentation ou de représentation de l'information, le format logique étant alors symbolique (par opposition aux formats de nature modale et analogique, la vision menant à un format imagé par exemple).

Ainsi, le processus représentationnel d'imagerie mentale est défini comme une activité symbolique de représentation (Paivio, 1971; Piaget & Inhelder, 1966) et non un « prolongement de l'activité perceptive » (Denis & Dubois, 1976). Certains auteurs rejettent même l'idée que l'appareil cognitif pourrait manipuler des images mentales symboliques, et critiquent la métaphore de l'image (pourtant intuitivement utilisée depuis l'Antiquité) pour asseoir une vision purement symbolique et propositionnelle de la représentation (Pylyshyn, 1973). La plupart des modèles cognitivistes proposent que l'information existe en mémoire sous la forme de réseaux sémantiques (p. ex. Collins & Loftus, 1975), ce qui suppose donc que la traduction de l'input perceptif se fait en direction d'un format arbitraire, sans lien direct avec le matériel original : ce sont des redescriptions de représentations sensorimotrices en un nouveau langage qui ne contient pas de qualités sensorimotrices (voir pour des revues Barsalou, 2003; Smith, 1978). La représentation correspond donc à un ensemble d'abstractions stockées en mémoire, chacune correspondant à une propriété du concept en question. De ce fait, les représentations sont classiquement décrites comme décontextualisées (Hollan, 1975), puisque ce niveau d'abstraction leur confère un caractère relativement stable et universel (le format logique ou propositionnel étant par essence adapté à la généralisation des connaissances).

La description cognitiviste classique des représentations mnésiques est particulièrement adaptée à la mémoire sémantique et au matériel lexical. Elle a d'ailleurs en ce sens énormément contribué au développement de l'intelligence artificielle (Newell & Simon, 1972) et à la compréhension du fonctionnement cérébral par le biais de modèles connexionnistes (McClelland & Rumelhart, 1985 ; Kriegeskorte & Douglas, 2018 pour une revue de littérature sur la question). C'est d'ailleurs à la suite d'observations neurophysiologiques chez l'animal que les travaux sur la mémoire spatiale ont été relancés, menant à l'élaboration des premiers modèles scientifiques décrivant spécifiquement la représentation spatiale.

2.1.1. Le concept de carte cognitive

2.1.1.1. *Travaux princeps et premières réflexions en éthologie*

La crise du behaviorisme menant à la révolution cognitiviste est parfaitement illustrée par les travaux expérimentaux sur l'apprentissage spatial chez le rat :

*Since neither chain reflex nor motor pattern accounts for the rat's behaviour in the maze, we ask once more what it is that the animal learns. The most obvious answer [...] is simply that the rat learns the place*⁴ (Woodworth, 1938, p. 135)

En effet, par exemple Spence et Lippitt (1946) obtiennent des preuves empiriques de l'apprentissage d'un lieu sans association stimulus/réponse préalable. Dans une étude de référence, les auteurs présentent à des rats rassasiés en nourriture et en eau un labyrinthe simple à deux branches-cible (labyrinthe en « Y »). Dans l'une des branches-cible est placée de l'eau, dans l'autre de la nourriture. Au cours de l'apprentissage étalé sur sept jours, les rats peuvent se déplacer librement et sont retirés du labyrinthe lorsqu'ils arrivent dans l'une des branche-cible (aucune préférence observée durant l'apprentissage entre l'une ou l'autre). Lors de la phase test, l'ensemble des rats est divisé en deux groupes : un groupe rassasié en eau mais pas en nourriture et l'autre groupe rassasié en nourriture mais pas en eau. Les résultats montrent que les rats ayant soif se dirigent significativement plus souvent vers la branche-cible contenant de l'eau, et inversement pour les rats ayant faim. Ces résultats et de multiples

⁴ « Puisque ni les chaînes de réflexes ni les patterns moteurs n'expliquent le comportement d'un rat dans un labyrinthe, nous posons une fois encore la question de ce que l'animal apprend. La réponse la plus évidente [...] est simplement que les rats apprennent un lieu » [traduction libre]

autres démonstrations analogues chez le rat (Hebb, 1938; Tolman, Ritchie, & Kalish, 1946), le chimpanzé (Menzel Jr., 1973) ou encore le loup (Peters, 1978) sont frappants car ils mettent en échec l'hypothèse d'un simple lien conditionné entre stimulus et réponse comportementale, amorçant l'idée d'un apprentissage plus complexe : celui de la configuration et des attributs du lieu.

Le concept d'un lieu stocké en mémoire pose problème aux behavioristes, mais s'insère parfaitement dans le prolongement de la réflexion cognitiviste sur les représentations. La représentation spatiale telle que décrite par les théories classiques s'appuie sur la métaphore de la « carte cognitive ». Cette expression fut employée pour la première fois par Edward Tolman en 1948, dans une revue de littérature portant sur l'apprentissage spatial de rats dans des labyrinthes : « *We believe that in the course of learning something like a field map of the environment gets established in the rat's brain [...] which finally determines what responses, if any, the animal will finally release*⁵ » (Tolman, 1948, trad. p. 192). Cette idée a été évoquée par d'autres auteurs avant Tolman, notamment Gulliver (cité par O'Keefe & Nadel, 1978, p. 63) qui aborda pour la première fois l'idée de carte mentale (Gulliver, 1908). De plus, plusieurs auteurs se sont intéressés à la cartographie dans différentes cultures et ont noté que ce format semblait naturellement plus souvent adopté que le langage dans la plupart des peuples dits « primitifs » (Hutorowicz, 1911), et devait donc exister dans l'esprit sous forme de « cartes imaginaires » chez l'animal comme chez l'homme (Trowbridge, 1913). Toutefois en raison de la pression exercée par le courant behavioriste, cette notion fut assimilée à la méthode introspective et donc « bannie » jusqu'à l'arrivée des démonstrations comportementales comme celles décrites précédemment, puis de la découverte des cellules de lieu hippocampiques.

2.1.1.2. *Les cellules de lieu*

En 1971, O'Keefe et Dostrovsky s'intéressent au fonctionnement de l'hippocampe chez le rat, une structure limbique située dans le lobe temporal médian. Ils procèdent à des enregistrements d'activité issue d'unités neuronales par le biais de l'implantation d'électrodes intracrâniennes en contact direct avec le champ CA1 de l'hippocampe. L'animal se déplace alors librement dans son enclos. Les auteurs observent l'activité de certaines unités

⁵ « nous pensons qu'au cours de l'apprentissage se forme quelque chose d'analogue à une carte du terrain de l'environnement dans le cerveau du rat [...] qui détermine finalement quelles sont les réponses, si réponse il y a, que l'animal va produire » [traduction libre]

déchargeant spontanément en réponse à la position de l'animal dans son enclos (voir *Figure 1*). Cette activité n'est liée qu'à la position absolue de l'animal et non à l'orientation de son corps ou à la trajectoire de son mouvement (O'Keefe & Dostrovsky, 1971; Poucet et al., 2010). Ces populations neuronales sont alors identifiées comme responsables de l'encodage d'une carte cognitive dans l'hippocampe, baptisées « *place units* » puis « *place cells* » (« cellules de lieu » ; O'Keefe, 1976, p. 90). Ces cellules de lieu ne semblent répondre à aucune stimulation sensorielle particulière, aucun comportement moteur et aucun changement motivationnel (O'Keefe, 1976). Elles furent par la suite mises en évidence chez l'humain (O'Keefe, Burgess, Donnett, Jeffery, & Maguire, 1998), en même temps que la découverte de populations neuronales complémentaires codant l'orientation dans l'espace (Hafting, Fyhn, Molden, Moser, & Moser, 2005; Ranck, 1985). Il fut alors quasiment universellement admis que l'hippocampe constituait le substrat de la représentation spatiale sous forme de carte cognitive⁶. La correspondance entre l'actualisation de la position dans l'environnement et la réponse neuronale conduit alors à penser que les cartes cognitives viseraient à respecter fidèlement les proportions du lieu mémorisé, ce qui a des implications importantes dans les premières formalisations des propriétés associées aux cartes cognitives.

⁶ Les travaux effectués sur les cellules de lieu et leur réseau étendu dans le cortex entorhinal (milieu des années 2000) mènera à l'attribution d'un prix Nobel de Physiologie en 2015, décerné à John O'Keefe, May-Britt Moser et Edvard I. Moser

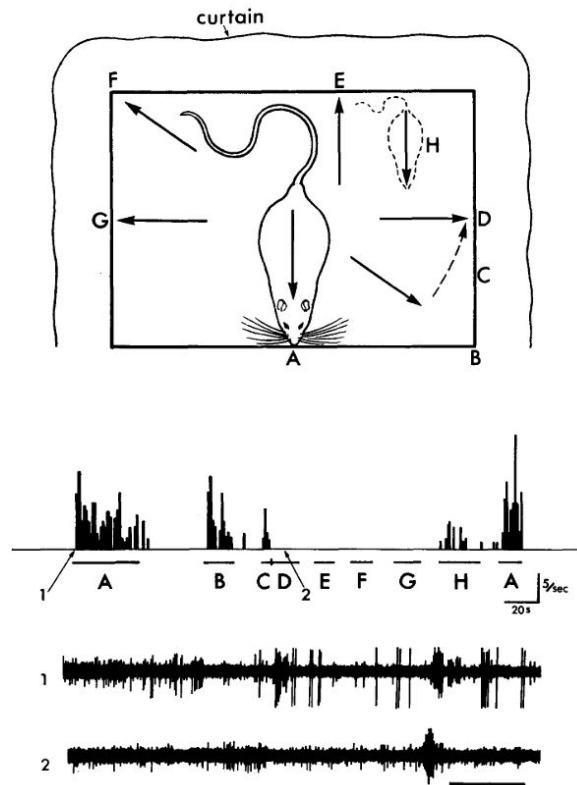


Figure 1 - Première observation des cellules de lieu, des unités neuronales spécifiques déchargeant en fonction de l'orientation spatiale du rat. Ici, l'activité d'une unité est reportée selon la position du rat dans la cage : on observe une hausse de l'activité neuronale de cette unité lorsque l'animal est principalement situé dans la direction « A » ou « B », mais pas dans les autres directions (tiré de O'Keefe et Dostrovsky, 1971, p. 173)

2.1.1.3. Les cartes cognitives chez l'humain

Selon une définition générale, les cartes cognitives sont le résultat d'un processus de cartographie mentale composé d'une série de transformations psychologiques par lesquelles un individu acquière, stocke, récupère et décode l'information traitant des positions relatives et des attributs d'un phénomène de son environnement spatial quotidien (Downs & Stea, 1973, p. 9). Les propriétés fondamentales des cartes cognitives (dans leur formalisation originale) sont décrites dans une tentative d'établir un cadre théorique systématique dérivé des théories classiques computationnelles. Par exemple, la première propriété des cartes cognitives est un principe transversal du cognitivisme : la structure des cartes cognitives n'est pas différente de la structure de tout processus cognitif (Kaplan, 1973). Kaplan affirme en effet que les cartes cognitives spatiales ne sont que des cas particuliers de cartes cognitives «

sémantiques » (Collins & Quillian, 1969; Collins & Loftus, 1975). Il fait ici le rapprochement entre la carte spatiale et la carte « thématique », utilisée pour faire la synthèse de faits, d'idées ou d'hypothèses (Miller & Voskuil, 1964). Ceci implique que toute information issue de l'environnement est traduite sous un format symbolique amodal, conférant ainsi aux cartes cognitives les fonctions d'une carte géographique sans pour autant disposer de propriétés picturales (Blaut, McCleary, & Blaut, 1970). Il ne s'agit donc pas d'une photographie d'un lieu mais plutôt une structure d'information (O'Keefe & Nadel, 1978).

La seconde propriété des cartes cognitives est l'isomorphisme (Thorndyke & Hayes-Roth, 1982) : bien que traduite en un format abstrait, l'information physique conserverait ses proportions et ses qualités géométriques dans les cartes cognitives. Ceci suppose donc l'existence d'une représentation similaire à une carte géographique, mais composée de symboles abstraits organisés selon une perspective de survol (Newcombe, 1985) conservant les relations spatiales à l'identique (Piaget, Inhelder, & Szeminska, 1960 ; Thorndyke, 1981). Cette « analogie » entre propriétés physiques et propriétés mentales peut conduire à des confusions (Downs & Stea, 1973) compte tenu de la supposée nature amodale et abstraite de la représentation : il faut ici la comprendre comme une préservation d'un système commun de coordonnées cartésiennes (Gallistel, 1990).

Troisièmement, ce système de coordonnées suppose l'utilisation de la géométrie euclidienne, appuyée par le principe d'espace physique absolu de Newton : étant donné l'ubiquité et le caractère adaptatif des notions euclidiennes et newtoniennes chez l'humain, il serait correct d'assumer qu'elles sont également utilisées dans la structure des mécanismes cognitifs (O'Keefe & Nadel, 1978). Cet argument est notamment dérivé des réflexions de Grünbaum (1964), qui parvient à la même conclusion par le biais d'un cheminement de questions du type : comment arriverions-nous à générer une métrique euclidienne à partir d'observations physiques non euclidiennes ? Si tout ce que nous voyons est non-Euclidien, pourquoi avons-nous mis deux cents ans à concevoir les principes d'une telle géométrie ? (Grünbaum, 1964). La méthode de déduction employée par Grünbaum n'est pas compatible avec les modèles actuels de la physique, puisque la théorie de la relativité générale (Einstein, 1920) établit que l'espace est bien non euclidien car ses dimensions sont instables, déformées par certaines forces (la gravité par exemple). De plus, l'hypothèse d'un isomorphisme euclidien est facilement réfutable sur le plan expérimental et de nombreux auteurs se sont

progressivement attachés à tester et infirmer chacune des trois propriétés précédemment décrites.

2.1.2. Arguments empiriques et évolutions de la carte cognitive

2.1.2.1. *Distorsions des propriétés métriques en mémoire*

Le concept de la carte cognitive existant dans l'esprit comme une cartographie géographique littérale de l'espace conservant les proportions métriques à l'identique fut rapidement critiqué. Nous décrirons dans les prochains chapitres les critiques apportées au postulat d'une nature amodale, puisqu'elles sont déterminantes dans l'apparition de modèles s'opposant aux visions classiques de la représentation spatiale. La présente partie se limitera à décrire les transformations apportées au concept de carte cognitive par l'observation de transgressions des propriétés euclidiennes et isomorphiques de la représentation.

De nombreux auteurs se sont intéressés à décrire les distorsions des propriétés métriques (angles et distances) observées en comparant l'apprentissage d'un lieu au souvenir de sa représentation en mémoire (la carte cognitive). Byrne (1978) observe des patterns d'erreurs systématiques dans l'estimation d'angles à partir de l'apprentissage d'un réseau routier. Les participants de cette étude de terrain ont eu pour tâche de parcourir des trajets (chemins à parcourir entre deux points déterminés) en milieu urbain, puis ont été testés sur leur connaissance du trajet (stockée en mémoire) par le biais d'une tâche de dessin de carte. L'amplitude des angles faisant la jonction de paires de routes fut ensuite calculée : bien que les angles réels fussent tous soit aigus (entre 60 et 70°) ou obtus (entre 110 et 120°), les participants ont significativement rapporté des angles pseudo-droits, variant très peu autour de 90°. Ce pattern d'erreur était également présent pour les participants disposant *a priori* d'une bonne connaissance de la ville (Byrne, 1979). La distorsion des proportions métriques en mémoire s'observe également dans l'estimation de distances : si un endroit est cloisonné en différentes parties par des barrières, les distances entre les parties séparées par des barrières opaques sont mémorisées comme plus grandes que lorsque les clôtures sont grillagées (Kosslyn, Pick, & Fariello, 1974; Pick, 1972). De plus, les vecteurs de distances liés aux points de repères (Burroughs & Sadalla, 1979) ou au centre de la représentation (Byrne, 1979) sont systématiquement surestimés. Globalement, les études portant sur la précision des propriétés métriques de la carte cognitive sont unanimes sur le fait que les distances et les angles ne sont jamais réellement conservés à l'identique dans la représentation construite à

partir de navigation ou d'étude de carte (Chase, 1983; Golledge, 1976; Hardwick, McIntyre, & Pick, 1976; Hart & Moore, 1973; Thorndyke & Hayes-Roth, 1982). L'isomorphisme semble donc partiel, et certains auteurs affirment que les distances psychologiques et physiques sont ajustables soit par une fonction linéaire (Baum & Jonides, 1979; A. A. Hartley, 1977; Kosslyn, Ball, & Reiser, 1978) soit par une fonction puissance analogue à celles en vigueur dans le champ de la psychophysique (p. ex. Kerst & Howard, 1978; Moyer, Bradley, Sorensen, Whiting, & Mansfield, 1978). Dans tous les cas, il semble que la complexité du matériel spatial empêche la mémorisation à l'identique du lieu, et ce en fonction des limites en termes de ressources cognitives et mnésiques (McNamara, 1986).

Toutefois on a observé que les erreurs commises dans les cartes cognitives ne concernent pas seulement la précision des propriétés métriques, mais aussi et surtout le respect des lois de la géométrie euclidienne. Beals, Krantz et Tversky (1968) définissent les propriétés euclidiennes d'une cartographie spatiale (physique ou cognitive) par le respect de plusieurs postulats, notamment celui de symétrie (la distance $AB = BA$) et d'additivité des segments ou de transitivité ($AB + BC = AC$). Or il est possible que ces deux postulats soient fréquemment transgressés dans les cartes cognitives (Beals, Krantz, & Tversky, 1968). Par exemple, les distances estimées depuis un bâtiment remarquable vers un bâtiment ordinaire sont rapportées comme plus courtes que celles, inverses, du bâtiment ordinaire vers le bâtiment remarquable (Burroughs & Sadalla, 1979; Sadalla, Burroughs, & Staplin, 1980). Ce type de violation de symétrie s'observe également lors de tâches de comparaisons de cartes à l'échelle d'un pays (A. Stevens & Coupe, 1978; Tversky, 1981). L'observation d'erreurs traduisant des violations du postulat d'additivité des segments routiers (Cadwallader, 1979; Sadalla & Magel, 1980; Sadalla & Staplin, 1980) se rajoutant aux transgressions de symétrie amène à penser que les distorsions de la carte cognitive pourraient générer des « figures impossibles » (Baird, Wagner, & Noma, 1982; Tversky, 1981). Ainsi de nombreux auteurs expriment des doutes quant à la nature euclidienne et isomorphe de la représentation (Baird et al., 1982; Byrne, 1979; Canter & Tagg, 1975; Stephen C. Hirtle & Jonides, 1985; A. Stevens & Coupe, 1978).

A la suite de ces observations, les cognitivistes ont enfin considérés les conséquences de la découverte du relativisme physique (Einstein, 1920) en rejetant les postulats (erronés) établis par Grünbaum (1961) : comme l'espace physique est non euclidien, il n'y a donc aucune raison de penser que l'espace psychologique soit euclidien si le matériel original ne

l'est pas (Bertalanffy, 1971). De plus, il semble illusoire de penser que le processus de perception des distances physiques soit de même nature que celui de récupération de ce type d'information en mémoire (Baum & Jonides, 1979). Si le signal physique est bien traduit en représentation symbolique, alors le matériel « psychologique » devrait disposer de ses propres particularités de traitement : d'ailleurs, on observe fréquemment que les erreurs commises dans les tâches de mémoire spatiale sont surtout de nature métrique, mais quasiment jamais de nature topologique (Kuipers, 1978 ; Lynch, 1960). Ainsi, il semblerait que le format de la carte cognitive, dont on a prouvé qu'il n'était pas analogue à une carte géographique, soit par nature spécialisé dans le maintien de la relation topologique entre éléments et non dans le maintien des propriétés métriques. C'est en suivant ce raisonnement que le concept de carte cognitive va évoluer vers celui de « schéma cognitif ».

2.1.2.2. *De la carte cognitive au « schéma cognitif »*

La représentation spatiale est schématique, vague, incomplète, déformée, voire simplifiée et idiosyncratique selon Kaplan (1973, p. 276). Des arguments neurologiques viennent confirmer que sa géométrie est imparfaite (Lieblich & Arbib, 1982). Ainsi que le stipule Kitchin (1994) dans un article de synthèse, la carte cognitive est progressivement considérée comme une métaphore (Kuipers, 1983; Spencer, Blades, & Morsley, 1989) et non plus comme un objet analogique physiquement inscrit dans l'hippocampe (O'Keefe & Nadel, 1978). Il est alors admis que la carte cognitive est un moyen de synthétiser sous une forme facilement intelligible un ensemble de connaissances spatiales complexes, faisant de ce concept une « fiction commode » (Siegel & Cousins, 1985). Un changement théorique s'opère et les représentations spatiales sont dès lors décrites avec un niveau d'abstraction plus élevé (« *des entités hypothétiques internes* », Newcombe, 1985) mettant au premier plan leur nature logique amodale adaptée à la représentation des relations topologiques.

Par exemple, le modèle TOUR (Kuipers, 1977, 1978) est le premier modèle computationnel simulant le fonctionnement des cartes cognitives par l'informatique. Ce modèle considère la représentation spatiale comme un outil de résolution de problèmes, et l'accent est mis sur la question des ressources computationnelles : l'apprentissage doit être facile et les performances doivent se dégrader graduellement à cause de restrictions de ressources (Kuipers, 1978). Ainsi Kuipers divise son modèle en trois classes de représentations intégrées : les connaissances acquises sur un environnement en particulier, la description de la position actuelle, et les règles d'inférences permettant de manipuler la

connaissances des deux autres classes (Kuipers, 1978). Cette dernière composante est donc responsable du processus de résolution de problème, appliqué ici à des tâches de planification d'itinéraires par exemple. Les connaissances acquises sur l'environnement sont codées en symboles abstraits permettant à l'ordinateur de générer la simulation : les lieux sont des nœuds (« *nodes* »), et le réseau de connexions entre eux sont simulés par des segments appelés « *edges* » [arêtes]. L'ensemble forme un schéma topologique reflétant les relations entre lieux sans pour autant disposer d'informations métriques. L'information contenue dans ce type de schéma est alors plus riche que la connaissance acquise par la navigation, mais moins riche que celle d'une cartographie littérale (Warren, Rothman, Schnapp, & Ericson, 2017).

Le modèle TOUR génère une représentation par lieu, et regroupe les lieux en régions afin d'économiser les ressources de traitement. Ce regroupement s'inspire des travaux de Rumelhart (1974), qui stipule que les estimations de distance à grande échelle doivent s'effectuer entre des régions imbriquées de façon hiérarchique, afin de ne pas dépasser la limite des ressources disponibles. Cette idée de hiérarchisation des données spatiales afin de permettre l'optimisation des ressources en informatique est alors transférée chez l'humain, toujours dans la logique du mouvement cognitiviste computationnel. Des modèles hiérarchiques de la représentation spatiale voient le jour notamment sous l'impulsion de Stevens et Coupe (1978), expliquant les déformations observées dans le jugement de distances non comme une preuve de la déformation de la carte cognitive mais plutôt comme une conséquence de l'organisation de la représentation sous forme de schéma logique abstrait (A. Stevens & Coupe, 1978). L'un des arguments en faveur de ce type de schéma hiérarchisé provient des travaux de McNamara (1986), qui a demandé à des participants d'apprendre la position d'objets disséminés dans une pièce divisée en différentes régions par des frontières conventionnelles (ficelles au sol). Les participants devaient ensuite effectuer une tâche d'estimation de distances euclidiennes (par exemple : « quelle était la distance entre la clé et les ciseaux ? »). Les résultats montrent que les participants surestiment significativement la distance entre deux objets proches se situant dans deux régions différentes, comparé à deux objets proches situés dans la même région. Ce pattern de résultats a également été observé lors de l'apprentissage de cartes divisées en régions par des frontières, et par le biais de simulations informatiques computationnelles (McNamara, 1986). D'autres observations montrent que cette subdivision de l'espace en régions existe en mémoire même en l'absence de frontières explicitement dessinées : en utilisant un paradigme d'amorçage lexical, on a pu

montrer que les participants ont tendance à reconnaître un objet plus rapidement si son nom était rapidement précédé du nom d'un objet proche, comparé au nom d'un objet lointain (Clayton & Chattin, 1989; McNamara & LeSueur, 1989).

Les résultats de ces études indiquent donc que les participants ont implicitement tendance à rassembler l'information spatiale en groupes hiérarchiques, à deux niveaux dans cet exemple particulier : un niveau local (intra-région) et un niveau global (régions entre elles). Les erreurs de distances absolues commises entre éléments appartenant à deux groupes locaux différents suggèrent que la représentation ne comporte pas en elle-même d'information métrique, mais que les distances et angles sont estimés *a posteriori* par un processus de jugement et non par le rappel en mémoire. Toutefois, pour les auteurs qui s'intéressent aux capacités de planification d'itinéraires (p. ex. Golledge, 1995) il apparaît que le concept de schéma topologique ne suffit pas à expliquer les comportements de sélection des itinéraires les plus courts ou la génération de raccourcis (Warren et al., 2017) : le schéma doit également comporter des informations métriques pour permettre ce type de planification complexe.

2.1.3. Modèles Mixtes et Modèles Mentaux

2.1.3.1. Modèles mixtes : topologiques et métriques

Le modèle du schéma topologique hiérarchique évolue donc vers une version « labellisée », c'est-à-dire enrichie d'informations locales de distances et d'angles. A l'origine de ce type de modèle se trouvent les travaux de Kosslyn (1987) sur la reconnaissance visuelle d'objets. Kosslyn divise le processus de localisation spatiale lié à la reconnaissance en deux parties : le traitement des *relations spatiales catégorielles* (non métriques, relations topologiques relatives) et des *relations spatiales coordonnées* (positions métriques des objets dans un référentiel commun). Selon l'exemple utilisé par Kosslyn, les relations spatiales catégorielles sont utilisées pour se représenter les relations logiques d'un ensemble multipartite flexible (p. ex. : la tête *au-dessus* des épaules, les mains *à l'extrémité* des bras...), alors que les relations spatiales coordonnées servent à estimer les relations spatiales entre des parties d'un ensemble relativement rigide, avec inclusion d'informations chiffrées de distances et d'angles (p. ex. les pieds d'une chaise, *positionnés à 90°* de l'assise). Cette dichotomie est généralisée à la représentation spatiale par McNamara (1992), qui postule alors l'existence de deux niveaux de représentations formées lors de l'apprentissage d'un lieu : une structure hiérarchique catégorielle et une structure métrique (positions absolues des objets

dans un système abstrait de coordonnées). Ces deux niveaux de représentation concomitants expliquent selon lui les effets de regroupement hiérarchique (Clayton & Chattin, 1989; McNamara, 1986; McNamara & LeSueur, 1989) et d'asymétries (Burroughs & Sadalla, 1979; Sadalla et al., 1980; Tversky, 1981) : les transgressions des propriétés euclidiennes de la représentation seraient dues à l'intégration d'informations non-spatiales dans la structure hiérarchique, interférant avec la représentation métrique (McNamara, 1992). Cette idée est précisée par Poucet (1993), qui s'inspire des premières observations de dichotomies entre échelle locale et globale observées sur le plan neuro-anatomique (McNaughton, Leonard, & Chen, 1989) pour formuler un modèle hiérarchique de la représentation spatiale organisé en plusieurs étapes. Le principe de double représentation intégrant simultanément un réseau topologique dynamique et un réseau métrique est conservé. Poucet considère que le réseau métrique est constitué de vecteurs codant la localisation des endroits distants entre eux (de façon plus précise que le réseau topologique, mais moins complète car plus coûteuse en termes de ressources mnésiques et computationnelles). Ainsi la représentation spatiale se construirait durant l'apprentissage en trois étapes : la conversion de perceptions locales en représentations topologiques de lieux, la construction de schémas locaux reliant les lieux voisins entre eux par le biais de vecteurs métriques, et la synchronisation de chaque schéma local sur une référence directionnelle (par exemple, le Nord canonique). Un tel modèle permettrait de réduire la dépense de ressources cognitives au minimum tout en atteignant un niveau quasi-optimal de performances spatiales (Poucet, 1993).

Enfin, le modèle TOUR (Kuipers, 1977) a évolué vers une version baptisée *Spatial Semantic Hierarchy* (Kuipers, 2000). Dans cette nouvelle version, les informations spatiales sont organisées selon deux dimensions, la première allant du qualitatif vers le quantitatif, et la seconde divisant la représentation selon l'état de l'information partielle, et donc son niveau d'abstraction (du sensoriel au causal, puis au topologique, et enfin au métrique). Ainsi l'information spatiale (dont la voie d'entrée est sensorielle) est progressivement transformée en représentation abstraite topologique (connectivité et informations qualitatives sur les lieux/régions) puis en carte globale (quantitative) au niveau métrique. La subdivision hiérarchique de la représentation intervient donc à différents niveaux d'abstraction, formant ainsi des cartes « patchwork » constituées de schémas locaux, pouvant être intégrés en un seul cadre de référence si des quantités suffisantes d'informations et de ressources cognitives sont disponibles. La structure de la représentation décrite dans ce modèle est donc tout à fait

similaire à celle décrite par Poucet (1993), la seule différence étant que le modèle *Spatial Semantic Hierarchy* est optimisé pour une généralisation dans le domaine de la robotique.

L'émergence des modèles hiérarchiques de la représentation spatiale a donc progressivement conduit à l'élaboration de modèles mixtes, considérant la coexistence de deux formats de représentation (topologique et métrique). Ce type de conception est encore aujourd'hui représenté à travers des modèles relativement récents synthétisant explicitement les concepts de carte cognitive et de schéma cognitif (Meilinger, 2008; Warren et al., 2017) (voir Figure 2).

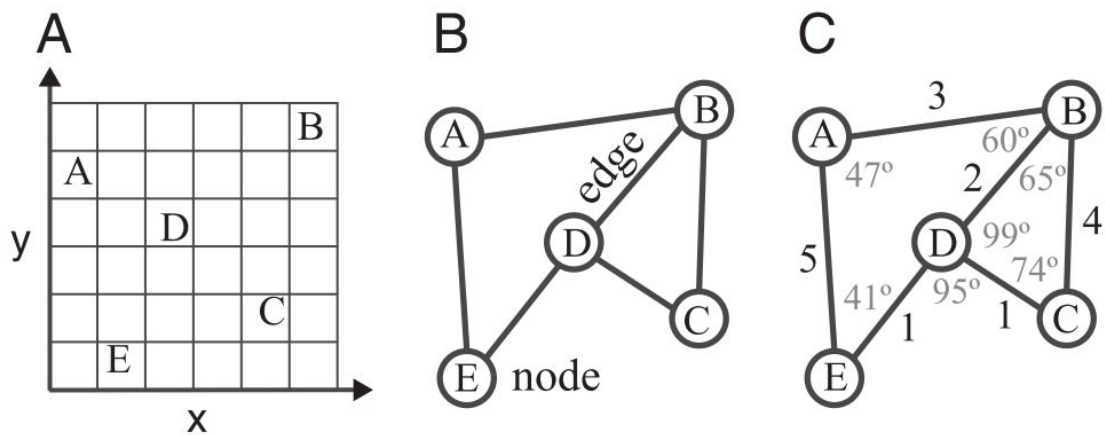


Figure 2 - Illustration schématique des différents modèles : A = carte cognitive ; B = Diagrammes topologiques ; C = Diagrammes labellisés (tiré de Warren et al., 2017, p. 153)

2.1.3.2. *Le Modèle Mental : une rupture conceptuelle*

D'autres conceptions théoriques sur la nature des représentations se sont développées parallèlement aux modèles issus du concept de carte cognitive. Parmi elles, la théorie des modèles mentaux (Johnson-Laird, 1983) fournit un cadre explicatif particulièrement adapté aux processus de traitement de l'information spatiale. Selon Johnson-Laird, un modèle mental est une construction en mémoire de travail reflétant une situation sous un format non-arbitraire : une structure analogique représentant les aspects pertinents d'un état donné du réel (Johnson-Laird, 1980). Le modèle mental ne peut être réduit à sa description linguistique, propositionnelle : il peut être construit à partir du langage ou à partir d'informations perceptives (H. A. Taylor & Tversky, 1992), et reflète la structure sous-jacente amodale et non la description de la situation (Johnson-Laird, 1980). Le modèle mental n'est pas non plus une carte cognitive stockée à long-terme, car il existe de façon dynamique en mémoire de travail et peut être mis à jour en temps réel, y compris par l'apport d'informations provenant de la mémoire à long-terme (Tardieu, Ehrlich, & Gyselinck, 1992), sans adopter de perspective particulière (Tversky, 1991). Enfin, le modèle mental n'est pas non plus un schéma cognitif topologique car il est analogique (Rinck & Bower, 2000) : il conserve les proportions et relations à l'identique (mais pas sous un format métrique), requérant donc plus de ressources cognitives que l'encodage littéral d'une description sous un format propositionnel de surface (Mani & Johnson-Laird, 1982). Pour cette raison, les modèles mentaux spatiaux (créés à partir de descriptions verbales, Pazzaglia, Gyselinck, Cornoldi, & De Beni, 2012, ou de la perception de configurations spatiales) sont supposés être particulièrement utilisés lors du traitement d'environnements simples ou connus : ils permettent alors la prise de perspective, la réorientation, et l'inférence (Tversky, 1993). Dans les autres cas (environnements complexes ou inconnus), la carte cognitive (ou d'autres types de représentations spatiales) sera utilisée. La théorie des modèles mentaux est une véritable rupture conceptuelle avec les théories classiques de la représentation, puisqu'elle introduit des idées nouvelles qui permettront une évolution dans les théories de représentation.

La théorie des modèles mentaux introduit un nouvel élément contrastant avec les modèles précédemment discutés : un modèle spatial peut être dynamique, flexible, provisoire (Ehrlich, Tardieu, & Cavazza, 1993). Il n'est pas forcément gravé en mémoire à long-terme mais peut exister en tant que structure de compréhension du réel en mémoire de travail. Dans cette optique, le modèle mental n'est pas une traduction du réel en information symbolique, il

s'agit d'une simulation amodale de la situation initiale. Cette conception rend donc obsolète la tendance traditionnelle à décrire les représentations spatiales selon des métaphores imageables (« cartes » cognitives, « schémas » topologiques...). Elle fait écho à des critiques adressées au concept de cartes cognitives, décrivant de telles théories comme des « *convenient fictions* » [fictions commodes] (Siegel, 1981) correspondant non pas à la réalité de la représentation interne mais plutôt au produit externe de l'information rapportée (Buttenfield, 1986; Kitchin, 1994).

Un autre problème soulevé par la théorie des modèles mentaux est qu'une représentation n'est pas forcément dédiée à un type d'information (selon une vision modulariste illustrée par Fodor, 1983) mais peut être impliquée dans différentes tâches, relevant de différents mécanismes autrefois considérés comme hermétiques les uns par rapport aux autres. Ainsi un modèle mental spatial peut servir non pas à la restitution de la configuration spatiale mais à l'inférence de positions, ce qui le met au service de processus de prise de décision ou de raisonnement et non de pure mémoire spatiale. Cette approche fonctionnaliste de la représentation spatiale est adoptée dans la présente thèse, et provient de l'idée selon laquelle le traitement de l'information spatiale dépend des activités réalisées durant l'apprentissage. Ceci implique que le format et les propriétés de la représentation spatiale peuvent varier en fonction des buts et des paramètres de la tâche à accomplir (Grison & Gyselinck, 2019; Gyselinck, 2013). On retrouve cette idée dans l'œuvre remarquable de Barbara Tversky, qui a considéré très tôt que la « connaissance environnementale » pouvait s'organiser sous différentes formes en fonction des tâches à accomplir ou de l'échelle de l'espace considéré. C'est en particulier dans les écrits de Tversky que se trouvent explicitement exprimées les premières réflexions constructivistes rejetant la séparation entre connaissance spatiale et connaissance non spatiale :

Despite its considerable appeal, as traditionally used, the "cognitive map" metaphor does not reflect the complexity and richness of environmental knowledge. That knowledge comes in a variety of forms, memory snippets of maps we've seen, routes we've taken, areas we've heard or read about, facts about distances or directions. It can also include knowledge of time zones and flying or driving times and climate. Even knowledge of historical conquests and linguistic families can be used to make inferences about spatial proximity. Some of that information may contain errors,

*systematic or random. When we need to remember or to make a judgment, we call on whatever information seems relevant.*⁷ (Tversky, 1993, p. 21).

Ainsi Tversky considère le modèle mental spatial comme pertinent dans la résolution de tâches d'inférence dans des environnements familiers et de petite échelle, dans lesquels l'information métrique n'est pas pertinente pour juger des relations spatiales catégorielles. Dans les autres cas et en raison de sa prise de position nette sur la nature constructiviste et multifactorielle des représentations spatiales, Tversky recommande l'utilisation de la métaphore des « collages spatiaux » (Tversky, 1993). Ce type de représentation sera plus amplement traité dans la prochaine partie, étant une parfaite illustration des approches écologiques de la mémoire spatiale. En effet, les travaux de Tversky (à la suite de la théorie des modèles mentaux de Johnson-Laird) participent à la construction d'un champ théorique alternatif aux théories classiques computationnelles : les théories de la cognition située et incarnée.

⁷ « En dépit de son attrait considérable, la métaphore de la carte cognitive, telle qu'elle est traditionnellement utilisée, ne reflète pas la complexité et la richesse de la connaissance environnementale. Cette connaissance se présente sous une variété de formes, de fragments de cartes que nous avons vues, de routes que nous avons empruntées, de régions dont nous avons entendu parler ou que nous avons découvertes par nos lectures, de faits se rapportant à des distances ou des orientations. Elle peut également inclure la connaissance des fuseaux horaires, les temps de vol ou de conduite et le climat. Même la connaissance des conquêtes historiques et des familles linguistiques peut être utilisée pour faire des inférences de proximité spatiale. Certaines de ces informations peuvent contenir une certaine part d'erreur, systématique ou aléatoire. Lorsque nous devons nous rappeler ou émettre un jugement, nous faisons appel à tout type d'information pertinent » [traduction libre]

2.1.4. En résumé : cartes et schémas, métaphores trop restrictives

Dans cette première partie, ont été décrites les évolutions successives du concept de représentation spatiale. En opposition avec les doctrines héritées du béhaviorisme, l'approche cognitiviste computationnelle s'est développée en faisant appel à la notion de représentations mentales. Ces représentations, en tant que fragments d'informations stockées sous une forme structurée, ont notamment été utilisées pour décrire comment la complexité de l'information spatiale pouvait s'organiser de façon cohérente en mémoire.

Ainsi les premiers modèles théoriques de la représentation spatiale ont utilisé la métaphore de la cartographie géographique pour expliquer la forme et les propriétés de la représentation spatiale. Selon cette première définition unifiée sous le terme de « cartes cognitives », l'esprit construirait une représentation de survol d'un lieu, conservant des informations métriques isomorphiques dans un système de coordonnées cartésiennes. Or les postulats de ce type de conception ont été mis à l'épreuve par un grand nombre d'observations expérimentales, suggérant non seulement que la représentation spatiale ne reproduirait pas fidèlement les propriétés métriques du lieu, mais également qu'elle ne respecterait même pas les axiomes de la géométrie euclidienne.

Une seconde famille de modèles a ensuite émergé, s'appuyant sur un postulat différent : la représentation spatiale ne serait que topologique et ne contiendrait pas d'informations métriques. Selon cette approche de la représentation sous forme de schémas cognitifs, seules les relations catégorielles seraient encodées entre les différents lieux et positions de l'environnement. Cette approche a donc rejeté le format symbolique de survol de la cartographie pour adopter une vision plus proche du schéma logique. Ce format représentationnel fut notamment particulièrement adapté à la représentation de l'information spatiale dans le traitement de l'information informatique, puisqu'elle implique une hiérarchisation de l'information en différentes régions, réduisant ainsi les coûts computationnels.

La métaphore du schéma topologique a elle aussi montré certaines limites, notamment parce qu'elle implique la disparition des informations métriques en mémoire. De nombreux modèles se sont développés afin de réintroduire ce type d'information primordiale au traitement spatial sous la forme de schémas topologiques labellisés d'informations de distances et d'angles. Ces modèles topologiques enrichis ont été importants dans l'évolution de la réflexion théorique puisqu'ils impliquaient notamment l'inclusion de différents

processus de traitement spatial, l'information n'étant plus unifiée sous un seul format mais divisée en plusieurs processus (traitement local/global, topologique/métrique, avec différents niveaux d'abstraction).

Ces premières idées de traitements dynamiques et multiples sont devenues ensuite centrales dans la conceptualisation des représentations spatiales, et nous avons pu identifier la rupture théorique établie par la théorie des modèles mentaux de Johnson-Laird (1983). Cette théorie, bien que non restreinte au matériel spatial, a grandement contribué à faire passer un nouveau cap aux modèles de la représentation, en admettant une nature flexible et dynamique des modèles de situations stockés en mémoire de travail. En cela la théorie des modèles mentaux constitue un ancrage puissant pour de nouvelles réflexions fonctionnalistes illustrées par les travaux de Barbara Tversky : le matériel spatial devient progressivement de moins en moins modulaire, de plus en plus enrichi d'autres types de formats d'information.

C'est cette approche fonctionnaliste et constructiviste, rejetant l'indépendance totale entre information spatiale et autres types de traitements que nous allons à présent examiner. Toutefois, il faut souligner l'importance majeure des réflexions théoriques ayant conduit à ce type d'approche. Bien que trop restrictives dans la formulation de leurs propriétés, les concepts de cartes cognitives ou de schémas topologiques ont été nécessaires à la formulation d'hypothèses alternatives et à l'évolution des modèles théoriques. Par leur grande force didactique, ces premiers modèles computationnels ont contribué à de grandes découvertes (p. ex. cellules de lieu, O'Keefe & Nadel, 1978) tout en permettant enfin aux sciences cognitives de s'affranchir de la tradition béhavioriste pour faire valoir l'intérêt de leurs méthodes et réflexions.

De plus, si le concept de « carte cognitive métrique » est encore défendu dans des travaux récents (Cheeseman et al., 2014), c'est notamment parce que ce type de représentation peut se révéler pertinent dans la résolution de certaines tâches. Il apparaît donc important de défendre une vision intégrative de la représentation spatiale, se constituant en fonction des buts et des tâches anticipées, et pouvant ainsi prendre différentes formes en fonction du format d'organisation des connaissances adapté à la situation actuelle. Dans cette optique, il est possible que la carte cognitive puisse être l'une des nombreuses formes que peut prendre la représentation spatiale. Toutefois, ses propriétés sont trop restrictives pour rendre compte de la richesse de l'information spatiale dans son intégralité, ce qui justifie donc l'apparition de modèles théoriques écologiques s'attachant à décrire comment différents formats

d'information issus de l'interaction entre l'individu et son milieu peuvent contribuer à la construction des représentations spatiales.

2.2. APPROCHES ECOLOGIQUES DE LA COGNITION

Ainsi que nous l'avons énoncé dans les précédents chapitres, l'approche cognitive dite classique considère les processus mentaux comme indépendants des processus perceptifs et moteurs, qui sont alors de simples voies d'entrée (« input ») et de sortie (« output ») du système de traitement de l'information (p. ex. Pylyshyn, 2003). Selon cette approche, la perception, qui est à la base de la collecte d'informations issues du réel, peut être considérée comme un processus de catégorisation sémantique (Bruner, 1957) : l'input sensoriel étant destiné à être traduit en réseaux de représentations sémantiques. Or cette définition de la perception n'est pas universellement admise et se confronte très tôt à des modèles théoriques opposés à l'idée de sémantisation systématique de l'information sensorielle. Parmi les premiers opposants du mouvement computationnel se trouve le courant de la psychologie écologique dont les idées sont illustrées par les écrits princeps de Gibson. Gibson (1979) dans sa théorie écologique de la vision, explique le comportement comme la conséquence d'un processus de perception dynamique visant à établir des relations fonctionnelles entre les particularités d'un environnement et les capacités d'action des individus. Ainsi Gibson ne considère pas que la perception vise à construire une représentation objective de la réalité ou à catégoriser ses éléments en concepts sémantiques : pour lui la perception vise à prendre connaissance des possibilités d'actions offertes par l'environnement.

Cette approche est dite écologique car elle met l'accent sur la relation dynamique et réciproque entre l'organisme et son milieu (Turvey & Shaw, 1995), décrivant la perception et les processus mentaux comme dépendants d'un contexte environnemental⁸. Cette importance particulière donnée au contexte environnemental provient de l'idée que le but de tout organisme est de tendre vers la survie, qui est rendue possible par le biais d'actions adaptées dirigées vers des buts utiles. Bien que considérée comme le point de départ des approches écologiques de la cognition, la théorie de Gibson est aussi fortement inspirée des théories idéomotrices (p. ex. James, 1890) ou de la phénoménologie (p. ex. Merleau-Ponty, 1945) : ce sont les interactions sensorimotrices qui permettent à l'organisme d'acquérir des informations sur les contingences entre le mouvement et son impact sur l'environnement, nécessaires à la survie. On peut également noter l'influence des écrits de Berkeley (Berkeley, 1709/2002) ou de Poincaré (Poincaré, 1902) pour insister sur le retour à des conceptions peu investies par les théories traditionnelles cognitivistes : la psychologie écologique illustrée par Gibson rétablit

⁸ L'approche écologique est de ce fait souvent décrite en psychologie sous le terme « contextualisme » (p. ex. Hoffman & Nead, 1983)

le rôle du corps en interaction avec son milieu comme objet de référence des traitements cognitifs.

Par exemple, la perception visuelle consiste pour Gibson en l'extraction d'invariants tirés du flux optique généré par l'évolution de la scène visuelle en fonction du mouvement de l'observateur : les éléments dont la structure ne change pas malgré les transformations du flux optique (formes, tailles, couleurs). Ces invariants sont immédiatement traduits en ce qu'il appelle des « *affordances* » (Gibson, 1979, p. 127), des possibilités d'actions automatiquement suggérées par l'environnement. Dans le domaine de la cognition spatiale, ce terme peut être interprété en considérant qu'un élément géographique suggère un répertoire comportemental particulier : par exemple, un ruisseau « *afforde* » une action de saut si l'individu est en mouvement rapide d'approche (Turvey & Shaw, 1995). Ceci suppose une rupture nette avec la conception traditionnelle de la représentation mentale : le ruisseau n'est plus seulement un concept sémantique amodal mais il amorce également des représentations motrices modales. L'environnement n'est plus objectivement décrit comme un ensemble d'éléments catégorisables sur le plan sémantique, il est la cause de l'émergence de représentations liées à l'action. C'est précisément sur ce type de réflexions rejetant à la fois le dualisme corps-esprit hérité de la philosophie aristotélicienne ou cartésienne, et le postulat des computations amodales de la tradition cognitiviste (p. ex. Chomsky, 1957), que vont s'étayer les théories situées et incarnées de la cognition.

2.2.1. Les théories de la cognition située et incarnée

2.2.1.1. *De la nature des représentations*

Bien qu'il existe différentes approches situées et incarnées de la cognition, toutes rejettent (au moins en partie) la vision computationnelle classique des représentations comme systèmes symboliques et amodaux contenus en mémoire sémantique (Barsalou, 2008). La question de la nature de la représentation est alors abordée sous un nouvel angle : la représentation n'existe plus sous un format amodal mais prend partiellement la forme d'une simulation analogique des caractéristiques perceptives et motrices du concept. Toutefois ceci n'implique pas la disparition du concept de représentation au profit de la simple reviviscence : la simulation modale seule ne peut suffire au traitement de concepts abstraits et sémantiques (p. ex. le concept de « justice »). Pour cette raison, les approches situées et incarnées de la

cognition s'opposent essentiellement à la distinction nette établie entre la représentation amodale et les systèmes perceptifs et moteurs ayant contribué à sa création. Parmi les approches illustrant cette opposition mesurée, nous pouvons citer la théorie des systèmes de symboles perceptifs (*perceptual symbols systems*) de Lawrence Barsalou (1999).

La théorie des systèmes de symboles perceptifs établit une synthèse des approches computationnelles de la représentation et des approches écologiques (Barsalou, 2008). Selon Barsalou, la représentation est un système de symboles perceptifs : des éléments issus de l'expérience empirique d'états perceptifs sont extraits puis stockés en mémoire à long-terme, où ils fonctionnent en tant que symboles du concept original (voir *Figure 3*). Ces symboles sont considérés comme modaux car ils représentent des composants schématisés d'expériences perceptives (et non des expériences holistiques entières) encodés dans les réseaux dédiés au traitement sensorimoteur du cortex cérébral. Ils peuvent se combiner entre eux pour former des simulations d'évènement physiques ou introspectifs, dont les formes complexes parviennent à représenter des concepts abstraits (Barsalou, 1999). Les simulations sont alors définies comme des reviviscences⁹ d'états perceptifs, moteurs et introspectifs acquis durant l'expérience réelle avec le monde, le corps et l'esprit (Barsalou, 2008). La conséquence de cette définition est que les représentations sont dès lors supposées multimodales et analogiques (notamment par extension des travaux de Johnson-Laird). La multimodalité des symboles perceptifs peut être attestée par les travaux s'appuyant sur et utilisant la neuroimagerie : le traitement conceptuel de noms d'animaux (p. ex. tâches de décision lexicale) active principalement les aires visuelles alors que le traitement de noms d'outils active principalement les aires somatosensorielles (Martin, Haxby, Lalonde, Wiggs, & Ungerleider, 1995; Pülvermuller, 1999). A l'inverse, des lésions corticales localisées dans les cortex sensorimoteurs s'accompagnent de déficits dans le traitement conceptuel de catégories d'objets dont l'utilisation est impactée par les déficits moteurs (Damasio & Damasio, 1994; Warrington & Shallice, 1984).

⁹ Conscientes ou non

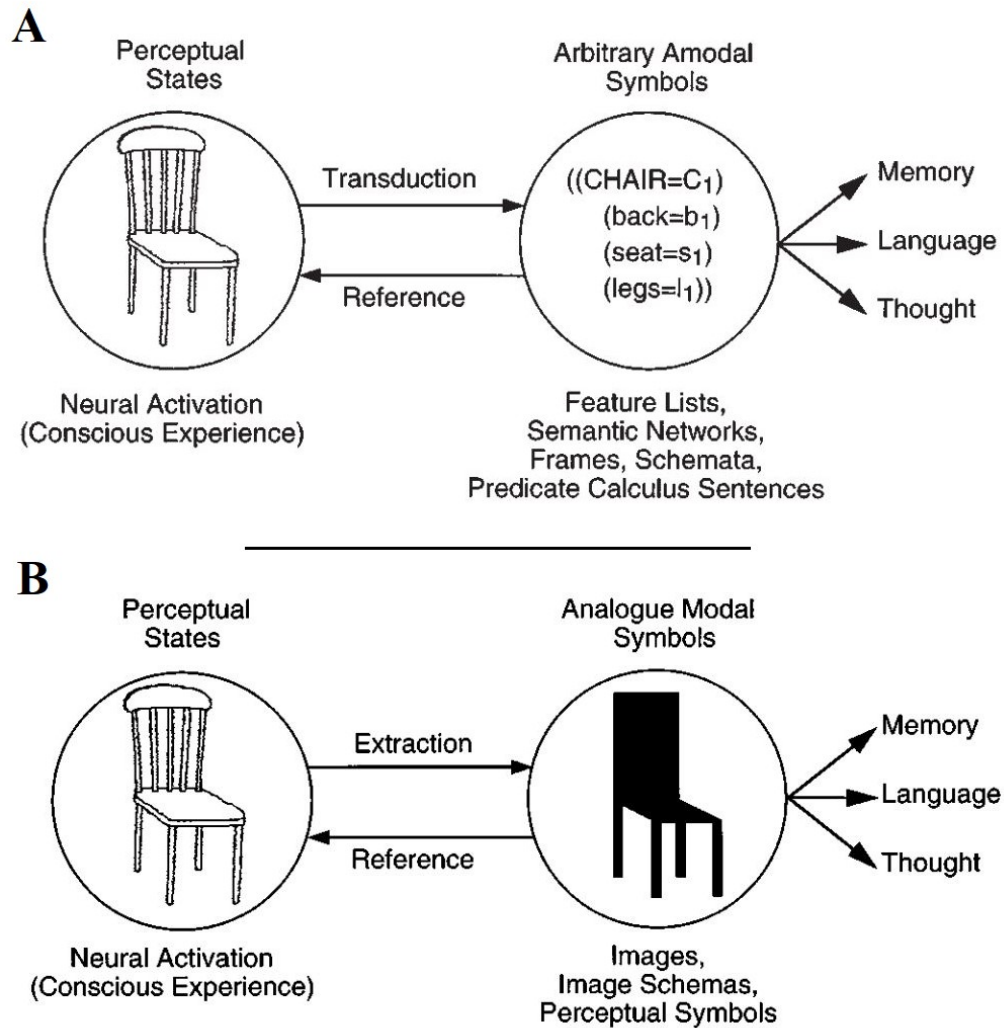


Figure 3 - Comparaison des représentations sous forme de symboles amodaux (A) ou de symboles perceptifs (B) selon la théorie des symboles perceptifs (tiré de Barsalou, 1999, p. 578-579)

Sur le plan comportemental, de nombreux arguments ont été réunis en faveur de cette approche de la nature des représentations. Par exemple, Goldstone (1995) a présenté à des participants des formes simples (lettres et chiffres) dont chacune était colorée d'une teinte particulière s'étalant du violet foncé au rouge foncé. Un second symbole apparaissait alors à l'écran, identique au premier mais coloré en noir uniquement. La tâche des participants était alors d'ajuster la couleur du second symbole afin qu'elle corresponde à celle du premier (en utilisant une échelle analogique représentant le continuum entre violet et rouge). Les résultats de cette étude montrent que les participants déforment la teinte des symboles dans le sens opposé aux autres symboles : si les « T » étaient légèrement plus rouges que les « L », leur

niveau de rouge sera surestimé par rapport à la couleur réelle (et *vice versa* pour les « L », en direction du violet cette fois-ci). Ce résultat est expliqué par Goldstone (1995) comme un marqueur de catégorisation implicite des associations symboles-couleur en prototypes (les « T » sont *plus rouges* que les « L », même si la distinction est arbitraire). Barsalou (2008) poursuit ce raisonnement en soulignant que la représentation du symbole a été enrichie d'un état perceptif (la couleur), qui a ensuite été simulé sous sa forme prototypique plutôt qu'holistique, en accord avec la théorie des systèmes de symboles perceptifs.

Ce principe de simulation est central dans l'approche située et incarnée. Parmi les études classiques ayant suggéré l'existence d'un processus implicite de simulation inhérent à la représentation, nous pouvons citer l'exemple de la compréhension de phrases, étude réalisée par Zwann, Stafield et Yaxley (2002). Dans cette série d'expériences, les auteurs ont donné aux participants des phrases à lire, dont le sujet (un animal ou un objet inanimé) était présenté dans un lieu particulier. Par exemple, « l'aigle est dans le nid » ou « l'aigle est dans le ciel ». Dans ces phrases, le lieu fournit un contexte suggérant une forme physique du sujet différente : la probabilité est forte que l'aigle ait les ailes déployées dans le ciel, alors qu'elles seront plus probablement repliées dans le nid. Pour les objets inanimés, la forme de l'œuf n'est plus la même si l'on compare son état dans le réfrigérateur (ovoïde) à son état dans une poêle (forme irrégulière). Après lecture de la phrase, les participants voyaient apparaître une image et devaient décider le plus vite possible si cette image était en relation avec la phrase précédemment lue. Lorsque l'image était liée à la phrase, la forme de l'objet ou de l'animal pouvait être celle induite par le lieu ou non. Les résultats montrent, en absence d'indication explicite sur la forme, que les temps de réponse étaient plus rapides pour les dessins congruents avec la situation décrite, que pour les dessins incongruents. Les dessins incongruents avec la phrase lue étaient traités plus lentement que les situations neutres (phrase n'impliquant aucune forme particulière de l'objet). Ces résultats appuient l'hypothèse d'une simulation des états perceptifs associés à l'activation de symboles : si les participants construisent des simulations pour se représenter les phrases, alors ces simulations devraient contenir des états perceptifs visuels liés à une forme particulière dans un contexte particulier. L'effet de congruence observé ici reflète donc un processus incompatible avec une vision purement amodale des représentations mentales.

Les travaux de Zwann et al. (2002) s'intègrent donc parfaitement dans l'approche située et incarnée dont le premier postulat est la nature multimodale et analogique des

représentations mentales. Ils constituent également une illustration du second postulat des approches situées et incarnées de la cognition : le fonctionnement mental n'est pas isolé du reste du réel, il n'existe qu'en interaction avec un contexte. En cela les approches situées et incarnées de la cognition sont dites écologiques car elles aspirent à replacer la compréhension de l'humain dans son milieu réel, en interaction avec celui-ci. Ainsi, le contexte dont il est question ici peut se diviser en deux parties, un contexte environnemental (cognition « située », dont nous avons abordé la présentation de quelques exemples précédemment), et un contexte sensorimoteur lié aux états du corps (cognition « incarnée »). Avant de discuter ces deux types de contextes il est important de signaler qu'ils ne sont absolument pas étrangers l'un à l'autre : la plupart des théories écologiques de la cognition incluent les deux sans distinction car ils varient toujours *a priori* ensemble. Cependant, certaines théories semblent mettre plus d'emphasis sur l'aspect « situé » de la cognition (voir M. Wilson, 2002) alors que d'autres investissent plus particulièrement l'aspect « incarné » (voir Gibbs, 2006).

2.2.1.2. *Cognition « située » et extensions cognitives*

Dans la lignée de la théorie écologique de Gibson, les approches situées de la cognition se définissent par le postulat que le contexte environnemental modèle les processus cognitifs. Elles incluent donc le couplage perception-action dans le fonctionnement cognitif (Prinz, 1997), qui ne sont alors plus de simples modules d'entrée et de sortie du système. L'une des illustrations les plus frappantes de ce postulat est le principe de spécificité de l'encodage (Thomson & Tulving, 1973) : les performances de rappel en mémoire sont facilitées si le contexte de récupération est réintroduit lors du rappel. Dans une expérience classique, Godden et Baddely (1975) ont fait apprendre des listes de mots à des participants issus d'un club de plongée en faisant varier le contexte d'apprentissage : sous la mer ou sur la plage. Les participants devaient ensuite effectuer une tâche de rappel libre, soit dans le contexte apparié avec l'apprentissage, soit dans l'autre contexte. Les listes de mots apprises sous l'eau étaient alors mieux restituées si le rappel se faisait sous l'eau également et non sur la terre ferme, et inversement pour le second contexte. Cet effet de congruence contextuelle incite de nombreux auteurs à penser que l'activité cognitive ne serait pas restreinte aux limites du cerveau mais pourrait englober l'intégralité de la situation dans laquelle elle s'effectue (Wertsch, 1998; M. Wilson, 2002).

Ce type d'approche est particulièrement bien illustrée par la notion de « *wide computationalism* » [computationalisme étendu] (R. A. Wilson, 1994), ou de « *extended*

mind » [esprit étendu] (A. Clark & Chalmers, 1998) : l'idée d'une extension des systèmes computationnels vers l'extérieur. Selon cette conception, la taxonomie des états mentaux selon des processus uniquement intrinsèques est remise en cause par la possibilité de l'esprit à intégrer en tant que partie de lui-même des éléments dépassant les limites physiques de son organisme. Ces éléments sont appelés des « extensions cognitives » (A. Clark & Wilson, 2009) qui ont les mêmes fonctions que les extensions non cognitives observables dans l'intégralité du règne animal (p. ex. les coquilles vides utilisées par les bernard-l'hermite pour garantir leur sécurité) : ce sont des ressources ne préexistant pas dans le système original, dont les propriétés fonctionnelles sont empruntées pour augmenter les capacités du système. Nous pouvons citer l'exemple décrit par Clark et Wilson (2009) du calcul posé sur papier : selon une vision étendue de la computation, une multiplication devient un processus causal entre des symboles internes (représentations des lois mathématiques) et des symboles externes (calcul représenté graphiquement sur un support papier, faisant office d'extension cognitive). Le processus de calcul n'est alors plus seulement opéré à l'intérieur de l'appareil cognitif mais résulte d'une série de cycles perception-action sur lequel s'étaye les opérations computationnelles internes (A. Clark & Wilson, 2009). Dans cet exemple, l'extension cognitive provenant du contexte environnemental est utilisée dans le but de libérer des ressources en mémoire de travail, mais aussi pour clarifier les résultats de la computation par un feedback perceptivo-moteur intelligible. La fonction des extensions cognitives est ainsi résumée par Clark (1989) :

*In general, evolved creatures will neither store nor process information in costly ways when they can use the structure of the environment and their operations upon it as a convenient stand-in for the information-processing operations concerned. That is, know only as much as you need to know to get the job done*¹⁰ (Clark, 1989, p.64)

Selon Clark, le fonctionnement cognitif privilégierait donc se délester le plus possible du coût cognitif de traitement de l'information, en utilisant les ressources de l'environnement (« *As much as possible, let the environment do the cognitive work* », Clark, 1989, p. 64). Mais il existe d'autres types de contextes qui ne sont pas utilisés à cette fin. Par exemple, le contexte peut aussi modeler le traitement sémantique : il a par exemple été observé que des participants devant définir des mots familiers donnaient des définitions différentes en fonction

¹⁰ « *En général, les créatures évoluées ne vont ni stocker ni traiter de l'information par des processus coûteux lorsqu'elles peuvent utiliser la structure de leur environnement et les opérations qu'elles réalisent dessus en tant que support pratique pour le traitement des opérations concernées. C'est-à-dire, ne sachez que ce que vous avez besoin de savoir pour que le travail soit accompli* » [traduction libre]

du contexte dans lequel ils se trouvaient (voir Barsalou et al., 1993; Shanon, 1988 pour des revues).

Parmi la variété de contextes pouvant modeler les processus mentaux illustrant la notion de cognition située, nous pouvons également citer l'exemple du contexte socio-émotionnel. La question de la représentation des états mentaux d'autrui (p. ex. « *theory of mind* », Premack & Woodruff, 1978, voir Goldman, 2012 pour une revue) a notamment été réinterprétée avec le concept de simulation : nous faisons des inférences sur les états mentaux d'autres personnes en simulant des états similaires. Ce processus de simulation vise à prédire les comportements (Gordon, 1986) par des allers-retours dynamiques entre « l'esprit cible » et la représentation de l'esprit simulé (Goldman, 1989; Heal, 1986). L'hypothèse de cette théorie de la simulation sociale trouve ses racines dans les travaux sur les neurones miroirs : un sous-ensemble de neurones issu du cortex pré-moteur s'activant durant l'observation d'une action faite par autrui chez le primate (Gallese, Fadiga, Fogassi, & Rizzolatti, 1996) et chez l'humain (Fadiga, Fogassi, Pavesi, & Rizzolatti, 1995). Les neurones miroirs ne répondent pas à la simple imitation motrice mais plutôt au but de l'action (Rizzolatti & Craighero, 2004) et sont également impliqués dans les processus d'imagerie mentale (voir Kosslyn, Thompson, & Ganis, 2006, pour une revue). Ainsi, en simulant des états mentaux et des symboles liés aux buts, l'individu utilise le contexte social comme une extension cognitive lui permettant de se mettre à la place d'autrui. Ceci permet notamment à l'individu de s'adapter efficacement en continu au contexte, notamment dans le cadre de la coopération ou encore du langage (Arbib, 2005).

Au-delà de ces exemples généraux sur la cognition située dans un contexte environnemental, nous aurons l'occasion de décrire plus amplement des travaux se focalisant sur le contexte spatial dans une prochaine partie.

2.2.1.3. *Cognition « incarnée » et mémoire pour l'action*

Le deuxième type de contexte dans lequel la cognition s'inscrit selon les approches situées et incarnées est le contexte sensorimoteur. En effet, le terme « incarné » (« *embodied* ») fait référence à l'interaction entre les processus mentaux et les processus internes liés au corps, qui peuvent causer des états cognitifs ou en être des effets (Barsalou, Niedenthal, Barbey, & Ruppert, 2003). Certains auteurs considèrent que le fonctionnement cognitif est incarné dans le sens où il ne se construit que par l'interaction physique avec le

monde (Harnad, 1990; Lakoff & Johnson, 1980). Une deuxième interprétation du terme « incarné » concerne plutôt la finalité des états cognitifs, dirigés vers des buts et des actions physiques. Bien sûr, la perception prépare à l'action en extrayant des possibilités d'agir sur son environnement (Gibson, 1979), mais d'autres auteurs vont aller plus loin en considérant que la mémoire est également dédiée à la programmation d'actions. C'est notamment l'hypothèse défendue par Glenberg (1997) : les concepts en mémoire ne sont pas des symboles « vides de sens » mais des patterns d'interactions physiques. Ces patterns sont combinés entre eux selon les affordances offertes par l'environnement et les contraintes propres liées au corps pour former ce que Glenberg appelle des « *meshes* » (« maillages » en français, l'idée de contrainte motrice étant primordiale chez Glenberg). Cette idée implique une conséquence particulièrement importante contrastant avec la tradition cognitiviste : si la mémoire vise à encoder des patterns d'interactions contraints par le corps (intégrer des affordances en mémoire), alors la compréhension et le traitement sémantique devraient dépendre des propriétés du corps de chacun.

En effet, la plupart des auteurs considèrent une part de la variabilité inter-individuelle en mémoire comme résultant de différentes contraintes corporelles. Globalement, l'idée mise en avant par Glenberg est que les concepts (et les objets en particulier) sont catégorisés en mémoire dans le but de soutenir les fonctions corporelles motrices. Plus spécifiquement, il avance par exemple l'hypothèse que le concept de « chaise », au lieu d'être encodé comme une unité de sens dont la fonction est de s'asseoir, sera compris différemment selon les capacités physiques de l'individu. La hauteur de l'objet, la largeur de l'assise, ou encore la dureté de la matière feront varier la qualité des « maillages » construits par rapport à ce concept selon que l'individu est un enfant, un adulte ou une personne âgée. Cette réflexion est sous-tendue par des résultats expérimentaux montrant par exemple que la largeur subjectivement estimée d'une ouverture de porte est négativement corrélée à la largeur réelle des épaules de l'individu (Stefanucci & Geuss, 2009) ou encore que la hauteur perçue d'un obstacle dépend de la taille réelle de l'individu (Warren, 1984), ou de la taille de l'avatar qu'il incarne (van der Hoort, Guterstam, & Ehrsson, 2011). Ces observations font émerger l'idée de la perception comme une « expression du phénotype » (voir Proffitt & Linkenauger, 2013, pour une revue). D'autres auteurs ont suggéré que les affordances encodées en mémoire à partir d'un obstacle dépendaient également de l'expertise motrice, notamment chez des participants experts en escalade (Pezzulo, Barca, Lamberti, & Borghi, 2010) ou en « parkour » (course d'obstacles urbains ou naturels) (J. E. Taylor, Witt, & Sugovic, 2011).

Ainsi la conception de la mémoire pour l'action de Glenberg rejoint l'idée selon laquelle les affordances seraient à l'échelle du corps (Warren & Whang, 1987), et contribueraient à « incarner » la cognition dans un contexte physique (voir Osiurak, Rossetti, & Badets, 2017 pour une revue sur la question des affordances).

Les conséquences d'un format de représentation multimodal (Barsalou, 1999) et d'une mémoire dirigée vers l'action (Glenberg, 1997) sont multiples. Tout d'abord, ceci implique l'abandon d'une perspective modulariste dans laquelle la mémoire est subdivisée en sous-parties indépendantes (Tulving, 1972), au profit d'une vision fonctionnaliste dans laquelle une représentation peut faire appel à des éléments sémantiques, épisodiques, et procéduraux. Ensuite, cela implique que des concepts sémantiques supposés amodaux activent également des simulations motrices, et non seulement des représentations perceptives seules (Zwaan et al., 2002).

2.2.1.4. *La simulation sensorimotrice : arguments empiriques*

Comme nous l'avons précédemment souligné, la nature située et incarnée des représentations suppose la génération automatique de simulations recrutant des cortex associatifs moteurs ou pré-moteurs pour faire émerger les symboles perceptifs (Barsalou, 1999). Ce concept de simulation sensorimotrice est fédérateur dans le paysage des théories écologiques de la cognition et de nombreuses données empiriques étayent cette position. Par exemple, Glenberg et Kaschak (2002) ont montré que la simple compréhension de phrases liées à une action directionnelle active une simulation sensorimotrice de l'action décrite, en l'absence de consigne explicite d'exécution d'un geste congruent. Dans cette étude, les auteurs ont présenté à des participants des phrases sur ordinateur. Le participant avait pour consigne de lire la phrase puis de décider le plus vite possible si la phrase avait un sens ou non en appuyant soit sur un bouton situé loin de son corps (mouvement d'extension du bras), soit sur un bouton situé près de son corps (mouvement de flexion du bras). Les phrases sur lesquelles les participants devaient établir un jugement de sens pouvaient soit impliquer un mouvement s'éloignant du corps (p. ex. « *poussez la porte* »), soit impliquer un mouvement se rapprochant du corps (p. ex. « *fermez le tiroir* »). Si la lecture de phrases implique la simulation sensorimotrice de la situation décrite, alors les temps de réponse devraient être plus longs pour les conditions incongruentes (la réponse « oui » est dans la direction opposée à l'action décrite) que pour les situations congruentes. Les auteurs observent bien cet effet de compatibilité (« *action-sentence compatibility effect* », Glenberg & Kaschak, 2002) suggérant

que la compréhension du sens d'une phrase décrivant un mouvement orienté active une simulation sensorimotrice de la situation décrite. Des effets de compatibilité d'action similaires ont également été rapportés par Tucker et Ellis (1998) qui ont montré que la simple présentation d'un objet manipulable dont l'affordance (la partie suggérant une action de préhension telle qu'une poignée) était latéralisée, amorçait une réponse motrice du côté de cette affordance. Cet effet est observable avec des durées de présentation d'images très courtes, entre 30 à 50 ms (Tucker & Ellis, 2004), et concerne non seulement la latéralité de la réponse motrice mais aussi sa « qualité » : des objets manipulés par des prises de précision (p. ex. une clé) amorcent l'activation musculaire correspondant à une prise de précision, et vice versa pour les objets manipulés par le biais de prises de force telle qu'un marteau (Ellis & Tucker, 2000).

L'effet de compatibilité d'action observé par Glenberg et Kaschak a également été répliqué à l'identique avec des phrases impliquant un transfert d'objets concrets, et cela même sous une formulation passive (p. ex. « *Andy vous a livré la pizza* »). Plus étonnant encore, Glenberg et Kaschak observent le même pattern de résultats pour des phrases décrivant un transfert d'idée abstraites (p. ex. « *Vous avez raconté l'histoire à Liz* »). L'existence de l'effet de compatibilité d'action pour des idées abstraites est un argument puissant en faveur des théories incarnées de la cognition, fournissant alors des éléments empiriques permettant de soutenir que même les concepts abstraits sont sous-tendus par des représentations modales. Ces travaux appuient l'idée selon laquelle les concepts abstraits seraient encodés sous la forme de métaphores simulables et imageables (Lakoff & Johnson, 1980), et que les individus comprennent la communication comme un type de transfert directionnel dans lequel les mots font office de conteneurs physiques (Lakoff, 1987).

Le second argument en faveur d'une composante perceptivo-motrice dans les représentations abstraites provient d'une série d'expériences conduites par Casasanto (2009), au cours desquelles l'auteur se demande comment il est possible de simuler des composantes sensorimotrices de concepts dont nous ne ferons jamais l'expérience par le biais des sens ou des muscles. Afin de répondre à cette question, Casasanto formule ce qu'il appelle la « *body-specific hypothesis* » : les individus interagissant avec leur environnement de façon systématiquement différente forment des représentations mentales systématiquement différentes. Afin de tester cette hypothèse, l'auteur s'inspire de travaux ayant montré un biais de latéralisation dans la perception de la valence émotionnelle : les actions effectuées avec le

côté droit du corps (ainsi que les stimuli présentés dans l'hémichamp droit) sont systématiquement corrélées avec des affects positifs, alors que les mêmes actions effectuées du côté gauche sont corrélées avec des affects négatifs (Davidson, 1992). Cette asymétrie fut initialement expliquée sur le plan cérébral par une spécialisation de l'hémisphère gauche (contralatéral à l'hémichamp droit) pour les comportements biologiques d'approche, et une spécialisation de l'hémisphère droit pour les comportements d'évitement (Davidson, Ekman, Saron, Senulis, & Friesen, 1990; Schiff & Bassel, 1996). Cependant ce biais peut aussi s'expliquer selon une perspective incarnée par les préférences motrices liées à la latéralité manuelle : si la grande majorité des individus sont droitiers (proportion estimée autour de 88% de la population française par exemple), la plus grande fluence perceptivo-motrice associée à la moitié droite de leur corps devrait corrélérer avec les évaluations affectives plus positives (p. ex. expérience chez les dactylographes professionnels, Van den Bergh, Vrana, & Eelen, 1990). L'effet inverse devrait être observé chez les individus gauchers, mais aurait été gommé par l'absence de contrôle de ce paramètre dans les précédentes études.

Ainsi Casasanto (2009) va chercher à observer comment ce biais d'asymétrie varie en fonction de l'expérience empirique spécifique des participants avec leur environnement, en contrastant la latéralité manuelle. En utilisant une tâche de catégorisation spatiale dans laquelle les participants devaient placer des concepts dans des emplacements latéralisés à droite ou à gauche, il montre que les gauchers ont bien tendance à associer les concepts émotionnellement positifs à gauche et les concepts négatifs à droite. Cette association entre main dominante et concepts à valence positive existe également pour les droitiers (positif à droite). Elle ne résulte pas d'un choix conscient, peut influencer les jugements de stimuli neutres (inférence de traits de personnalité positifs ou négatifs à partir de dessins « d'aliens »), et est observée même lorsque le participant n'utilise pas ses mains pour répondre. Ces résultats suggèrent donc que les concepts abstraits sont non seulement stockés en mémoire sous une forme partiellement accessible par le biais de simulations perceptivo-motrices, mais que les paramètres de ces simulations dépendent de l'expérience empirique particulière de l'individu avec son milieu. Ces conclusions sont en accord avec la vision dirigée vers l'action de Glenberg, mais apportent aussi de nouveaux éléments aux travaux classiques sur la spatialisation des concepts abstraits selon une « ligne mentale » horizontale (Dehaene, Bossini, & Giraux, 1993¹¹) : la culture seule ne suffit pas à expliquer la latéralisation des

¹¹ Spatial-numerical association of response codes (SNARC) effect

concepts abstraits car les paramètres incarnés de l'interaction avec le milieu influencent également ce processus par le biais de la simulation sensorimotrice.

La simulation sensorimotrice semble donc centrale dans une vision située et incarnée des représentations mentales, à la fois concernant des représentations issues d'expériences perceptives et des représentations de concepts abstraits ne pouvant pas être expérimentés par la sensation physique ou l'acte moteur. Nous verrons par la suite en quoi la simulation peut s'intégrer dans les modèles de la représentation spatiale. Avant cela, il semble tout de même important de mentionner quelques approches alternatives théoriquement liées au champ de la cognition située et incarnée, mais souvent dissociées en raison d'un vocabulaire et de préoccupations différents. Parmi ces approches écologiques « sœurs » de la cognition située et incarnée, la plus répandue est l'énactivisme (ou théorie de l'énaction).

2.2.1.5. Les théories de l'énaction

Les théories de l'énaction, comme toute approche écologique, trouvent leur racine dans le courant de la phénoménologie. Le concept de « *palpation avec les yeux* » issu des écrits de Merleau-Ponty (1945) est central dans la perspective énéactiviste sur la perception : la vision y est notamment décrite comme analogue au toucher.

*What we perceive is determined by what we do (or what we know how to do); it is determined by what we are ready to do. In ways I try to make precise, we enact our perceptual experience; we act it out*¹² (Noë, 2004, p. 1).

Il est aisé de faire le rapprochement entre cette perspective et celle initiée par Gibson (1979), avec tout de même une distinction principale : l'approche écologique de Gibson est focalisée sur les buts de l'action, alors que le courant énéactiviste (dans ses formes les plus radicales) met l'accent sur la sensation tactile/proprioceptive/motrice comme élément unitaire de toute perception. En cela le courant de l'énaction s'inspire principalement des idées de John Dewey (1896, trad. p. 362) : « *Le son n'est pas un simple stimulus ou une simple sensation, il s'agit encore une fois d'un acte, celui d'entendre* » composé de mouvements de la tête ou de la posture. Dewey insiste sur le concept de réponse motrice unifiant la perception : « *Il est aussi vrai de dire que la sensation d'un son provient d'une réponse*

¹² « *Les choses que nous percevons sont déterminées par ce que nous faisons (ou ce que nous savons faire) ; elles sont déterminées par ce que nous sommes prêts à faire. En des termes que je tente de rendre précis, nous énéactons notre expérience perceptive ; nous l'agissons* » [traduction libre]

motrice que de dire que la fuite est une réponse au son » (Dewey, 1896, trad. p. 362). Ainsi tout acte perceptif est inscrit dans un contexte biologique : l'organisme.

Le courant de l'énaction est particulièrement focalisé sur la question de la conscience : comment ressentons-nous ce que nous percevons ? O'Regan et Noë (2001), dans leur approche sensorimotrice de la conscience visuelle, affirment que ce mécanisme ne se fait pas à travers l'utilisation de représentations stockées en mémoire et réactivées lors de la perception. Au contraire, l'expérience visuelle serait un mode d'activité impliquant des connaissances pratiques sur les comportements possibles et les conséquences sensorielles de ces comportements (des contingences sensorielles donc). Ces contingences ne sont pas soutenues par des symboles perceptifs mais sont plutôt du registre du savoir-faire procédural. Pour clarifier cette distinction entre représentations et savoir-faire, les auteurs considèrent le monde comme une « *mémoire externe* » dont la méthode d'exploration est la perception visuelle, elle-même sous-tendue par l'extraction de contingences visuelles.

Le courant de l'énaction est également particulièrement illustré à travers les travaux princeps de Francisco Varela (1946-2001), dont l'œuvre a été dédiée à rapprocher la psychologie cognitive de la biologie. Dans cette optique, il définit le concept d'*autopoïèse*, comme la propriété d'un système biologique à se construire de lui-même, en interaction dynamique avec le milieu (Varela, Maturana, & Uribe, 1974). L'autopoïèse est une généralisation du mode de survie observé au niveau de la cellule vers des organismes complexes (les êtres humains notamment). Ce principe a été adapté à la cognition, en insistant donc sur le couplage organisme-environnement dans la construction de la connaissance par l'interaction sensorimotrice (Varela, Thompson, & Rosch, 1993).

En résumé, il existe des similitudes frappantes entre les théories de l'énaction et les théories de la cognition située et incarnée. Malgré quelques divergences théoriques localisées, il semble donc que toutes ces approches dites écologiques alternatives aux théories computationnelles traditionnelles soient unifiées sous un postulat de base : pour comprendre le fonctionnement de la pensée, il faut considérer les interactions entre l'esprit, le corps, et le milieu. Nous allons à présent décrire en quoi ces perspectives situées et incarnées peuvent apporter de nouveaux éléments au débat théorique spécifique qui nous anime : que sont les représentations spatiales ?

2.2.2. Une approche située et incarnée de la représentation spatiale

Les approches situées et incarnées de la cognition présentent un intérêt particulier dans l'étude de la mémoire spatiale puisqu'elles impliquent que l'organisme doit être conçu dans ses interactions avec le milieu, dont l'une des caractéristiques principales est qu'il est toujours de nature spatiale. En effet, selon un point de vue évolutionniste, la connaissance de l'espace est vitale pour la survie de l'individu et de l'espèce. Les premiers problèmes cognitifs auxquels sont confrontées les espèces douées de locomotion dans le milieu naturel sont toujours les suivantes : *où* trouver de l'eau et de la nourriture ? Comment *retrouver son chemin* vers l'abri après avoir récolté ces ressources ? C'est en raison de cette centralité de la composante spatiale dans la survie que plusieurs auteurs l'ont considérée comme un fondement transversal d'une grande majorité de processus mentaux, à l'image du langage par exemple (H. H. Clark, 1973; Lakoff & Johnson, 1980). Ne disons-nous pas que le temps *avance vite*, que nos pensées *tournent en rond* ou encore que le week-end *arrive* ? Toutes ces métaphores utilisées couramment évoquent un mouvement dans l'espace et font également écho à la tendance qu'ont les individus à spatialiser les concepts abstraits pour mieux les comprendre : arbres généalogiques, organigrammes ou encore schémas théoriques (voir les extensions cognitives, p. 58). *A fortiori*, spatialiser l'esprit lui-même et en particulier la mémoire semble non seulement naturel pour les grands penseurs depuis l'antiquité, mais semble même aider au fonctionnement de la mémoire (p. ex. la « méthode des lieux », p. 23). Parce que la pensée spatiale est centrale à toute existence, l'humain en devient très vite un expert. Toutefois, de manière paradoxale, la connaissance spatiale de l'humain à l'échelle individuelle est également lacunaire, systématiquement biaisée (Tversky, 1981, 2000).

Rétablissant le contexte environnemental comme central dans le fonctionnement mental, les théoriciens promouvant des approches écologiques de la cognition vont se servir de ces biais systématiques afin de penser de nouveaux modèles situés et incarnés de la représentation spatiale.

2.2.2.1. *Le corps comme référentiel de la représentation*

L'une des caractéristiques des modèles classiques de la représentation spatiale (cartes ou schémas cognitifs) est l'absence d'un référentiel égocentré : la position de l'organisme est supposée être calculée *a posteriori*. L'organisme en lui-même ne participe pas à la forme de la représentation. Dans la continuité des idées princeps de Poincaré (1902), Franklin et Tversky

(1990) ont testé expérimentalement l'hypothèse du corps comme un référentiel spatial à l'original du système d'axes et de coordonnées utilisé dans les représentations. Dans cette série d'expériences, les participants devaient lire des descriptions spatiales les mettant en scène dans un environnement particulier, entourés d'objets placés selon des axes définis par rapport au corps : devant, derrière, au-dessus, en dessous, à droite et à gauche (p. ex. « *directement derrière vous se trouve une plaque de bronze [...] au-dessus de vous se trouve un haut-parleur fixé sur le plafond du théâtre...* »). Après avoir appris le texte, les participants voyaient apparaître sur un ordinateur des phrases de réorientation : « *tout en restant à votre position, vous vous tournez de 90° à votre droite et faites maintenant face à la lampe* ». Chaque phrase était suivie d'une direction (ex. « à droite ») et le participant devait alors nommer l'objet qui était dans cette direction après réorientation, le plus vite possible. Les temps de réponse ainsi que la précision étaient mesurés. Selon Franklin et Tversky, trois patterns de réponses sont alors possibles :

- 1) Si la représentation spatiale créée à partir du texte est une réplique objective, stable et globale de l'environnement (une carte cognitive), alors toutes les directions sont *équivalentes* : les positions sont toutes au même niveau et aussi rapidement accessibles en mémoire car les distances entre la position du corps et les objets sont toutes les mêmes (Levine, Jankovic, & Palij, 1982).
- 2) Si la représentation spatiale est visuellement égocentrée et non cartographique, un processus de *transformation mentale* sera nécessaire au rappel des positions spatiales. Ce processus, depuis un point de vue incarné, consiste en une rotation mentale. Or il a été démontré que les temps de rotation mentale kinesthésique étaient corrélés au temps de rotation physique (Sekiyama, 1982). Donc les temps de réponse observés devraient être plus longs lorsque les objets nécessitent plus de rotation pour apparaître aux participants (derrière > à gauche = à droite = au-dessus = en dessous).
- 3) Enfin, si les participants créent des représentations dirigées vers l'action et construites par rapport à l'*accessibilité fonctionnelle* des différentes directions, les temps de réponse devraient être différents selon l'axe égocentré. L'axe vertical (tête/pieds) coïncide avec la gravité, une force asymétrique rendant les objets situés sur cet axe plus saillants les uns par rapport aux autres. De plus, les relations verticales ne changent pas durant la réorientation contrairement aux deux autres axes : les objets situés en dessous et au-dessus devraient être les plus rapides à localiser. Le premier axe horizontal (devant/derrière) sépare le monde pouvant être vu et manipulé du monde ne pouvant pas faire l'objet

d'interactions. En cela il devrait être plus facilement accessible que le second axe horizontal (gauche/droite), dont les directions ne sont pas fonctionnellement distinctes (non asymétriques comme les deux autres axes).

Les résultats de cette étude sont en faveur de la troisième hypothèse : les participants sont plus rapides à localiser les objets situés dans leur axe tête/pieds, puis devant/derrière, puis droite/gauche. Les axes fonctionnellement accessibles varient en fonction de l'inclinaison du corps dans l'espace : si les participants sont allongés, l'axe devant/derrière devient le plus rapide car il remplace l'axe vertical. Dans toutes les expériences, les temps de réponse pour les objets situés derrière l'observateur étaient toujours plus rapides que pour les objets situés à droite ou à gauche. Les auteurs avancent donc l'hypothèse de la création d'un cadre spatial (« *spatial framework* », Franklin & Tversky, 1990), servant à encoder dans la représentation spatiale non pas la simple position du corps mais les potentiels d'action et les asymétries de mouvement (voir *Figure 4*).

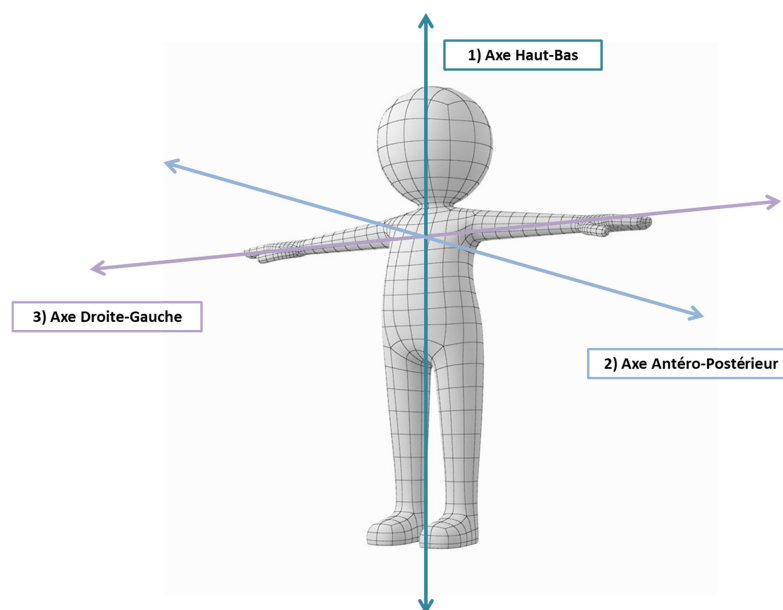


Figure 4 - Illustration du "spatial framework" mentionné par Franklin et Tversky dans leur expérience de 1990. L'axe haut-bas est le plus rapide d'accès, suivi de l'axe antéro-postérieur, puis enfin de l'axe droite-gauche (tiré de Tversky, 2003, p. 70)

Ces résultats mettent en lumière le rôle spécifique du corps dans la construction d'une représentation spatiale non plus simplement cartographique ou topologique, mais fonctionnelle. L'espace n'est plus un système de coordonnées mais un contexte « dédié à

l'action » (Gärbling & Golledge, 1989) dont la représentation mentale doit refléter les possibilités fonctionnelles. Plutôt que d'être isotrope, la forme de la représentation spatiale est modelée par le corps, les relations entre le corps et l'environnement, et les potentiels d'actions (Barsalou, 2008; Franklin & Tversky, 1990). C'est à la suite de ces observations, et dans la mouvance des théories situées et incarnées de la cognition, que Barbara Tversky proposera un remaniement des conceptions de la représentation spatiale : la connaissance spatiale pourrait s'organiser sous une forme complexe, multifactorielle et dirigée vers des buts (« *goal-directed* ») décrite sous le terme de *collage spatial*.

2.2.2.2. La métaphore des collages spatiaux de Tversky

Le point de vue de Tversky sur les représentations spatiales (Tversky, 1993) est fondamentalement constructiviste : la connaissance spatiale provient de l'expérience empirique avec le monde. Si nous sommes amenés à recueillir des informations spatiales disparates issues de formats divers dans notre expérience quotidienne (rappels épisodiques de trajets, souvenirs visuels de cartes, instructions verbales, faits sémantiques...), alors les propriétés de la représentation devraient être construites en fonction de cette expérience multimodale. Il est très peu probable que l'information spatiale dérivée de sources aussi multiples soit recompilée sous un format cohérent (carte ou schéma), et cela surtout lorsque l'environnement mémorisé est de grande taille ou peu familier. Par conséquent, Tversky postule que la représentation interne de l'espace est plus proche d'un *collage* : une construction thématique composée de multiples couches, de multiples formats d'information et de multiples perspectives (Tversky, 1993).

Selon ce point de vue, la représentation spatiale est systématiquement transformée et incomplète. Ce postulat est motivé par les observations d'erreurs systématiques dans l'estimation des propriétés métriques (p. ex. p. 40), mais également par les restrictions de disponibilité des ressources cognitives (McNamara, 1986) causant des biais systématiques dans la représentation : par exemple, la tendance qu'ont les parisiens à « horizontaliser » et lisser le tracé de la Seine en mémoire (Milgram & Jodelet, 1976) ou les Américains à faire de même avec la frontière canadienne (A. Stevens & Coupe, 1978; Tversky, 1981). Comme on l'a précédemment décrit, les angles de routes ont tendance à être régularisés vers l'angle droit (Byrne, 1979), et de nombreuses heuristiques simplifiant la structure spatiale ont été observées (S. C. Hirtle & Mascolo, 1992; Moar & Bower, 1983; Sadalla & Staplin, 1980). Ainsi les relations spatiales entre différents lieux ou éléments ne sont ni isomorphes (Downs

& Stea, 1973) ni même isotropes (Burroughs & Sadalla, 1979) : même lorsque le format de représentation fait appel à la modalité visuelle, la géométrie ne peut être euclidienne. Cependant, comme le souligne Tversky (1993), les jugements de distance sont particulièrement difficiles à recueillir sur le plan expérimental et semblent utiliser des « substituts » en mémoire, augmentant ainsi les sources de distorsions. C'est notamment pour cette raison qu'afin de rassembler plus d'arguments empiriques sur l'existence des collages spatiaux, nous allons présenter dans cette thèse des paradigmes expérimentaux conçus afin d'observer des variations objectives et sensibles dans les propriétés métriques en mémoire. Cependant la transformation des collages spatiaux est ici utilisée comme un outil permettant d'inférer des propriétés fonctionnelles de ce type de représentation. En particulier, la propriété qui fera l'objet des travaux empiriques de la thèse est la multimodalité des informations spatiales en mémoire.

Les collages spatiaux sont supposés multimodaux : les sources d'acquisition de l'information spatiale sont en effet multiples, ce qui signifie que les modalités sensorielles par lesquelles l'individu recueille ces informations sont également diverses. Ici encore, l'interaction entre l'organisme et son environnement est cruciale dans la construction de la représentation spatiale, dont certaines couches peuvent donc être conçues comme des généralisations des symboles perceptifs au matériel spatial (Barsalou, 1999). Dans un premier temps, ce postulat se justifie par l'observation que la représentation spatiale n'est pas limitée à stocker de l'information spatiale mais peut être influencée par d'autres types d'informations : par exemple, les buts et motivations semblent biaiser le rappel de positions spatiales (Spencer, Spencer, Blades, & Morsley, 1989; Wood & Beck, 1989), de même que la valence émotionnelle associée aux lieux (Brunyé, Gardony, Mahoney, & Taylor, 2012; Crawford, Margolies, Drake, & Murphy, 2006) ou encore les informations socio-démographiques (Maddox, Rapp, Brion, & Taylor, 2008; Portugali, 1993). De plus, lorsque des participants doivent replacer des points de repères sur une carte, la fonction des bâtiments (Stephen C. Hirtle & Jonides, 1985) ou les indices sémantiques contextuels (S. C Hirtle & Mascolo, 1986) incitent les participants à regrouper implicitement les points de repères en différents groupes dont les positions sont rapprochées de façon incorrecte. Ainsi les représentations spatiales ne semblent pas seulement schématiques, mais elles contiennent également des informations de nature non spatiale qui modulent leurs propriétés.

Les collages spatiaux sont aussi incarnés dans l'action et le corps : les représentations sensorimotrices liées à la locomotion semblent enrichir la représentation spatiale (Chrastil & Warren, 2012; Thorndyke & Hayes-Roth, 1982). Toutefois, la contribution du corps à la représentation spatiale est encore mal comprise. La plupart des études ayant traité de ce sujet se sont exclusivement concentrées sur le rôle du corps dans la perception des distances et non dans l'encodage ou la récupération des informations métriques en mémoire. Le but de cette thèse étant de mieux comprendre en quoi les représentations spatiales sont incarnées, nous consacrerons une partie entière aux arguments empiriques suggérant que le corps joue un rôle dans les propriétés de la représentation spatiale (p. ex. p. 81).

Pour résumer, la thèse de Barbara Tversky est une re-conceptualisation totale de la notion de représentation spatiale : l'espace tel qu'il existe en mémoire est *fragmenté, transformé, inconstant, incomplet* et *multimodal* (Tversky, 2005). Ces propriétés semblent totalement opposées à la vision classique de la représentation spatiale comme un objet mental organisé, servant à structurer le réel. Le caractère chaotique de la représentation que dépeint Tversky est pourtant bien plus proche de l'expérience empirique de l'individu au sein d'un environnement complexe (d'où son caractère écologique). L'intérêt de cette approche est qu'elle permet une certaine flexibilité de la représentation en fonction des activités effectuées par l'individu dans le monde réel : une « couche » de connaissance dans le collage spatial peut correspondre à un format d'information structuré de façon adaptée à la tâche à accomplir.

2.2.3. Différents espaces, différents formats de représentation ?

2.2.3.1. *Le modèle mental spatial*

Tversky considère que le collage spatial n'est pas adapté à toute situation : notamment dans le cadre de tâches simples, effectuées dans des lieux familiers et de petites dimensions, il semble que les individus soient plus enclins à construire ce qu'elle appelle des modèles mentaux spatiaux (Tversky, 1991, 1993, 2003, 2005). Ces modèles mentaux sont inspirés de ceux décrits par Johnson-Laird (Johnson-Laird, 1980; Mani & Johnson-Laird, 1982) : il s'agit de représentations capturant les relations catégorielles spatiales de façon analogique (Pazzaglia et al., 2012), ne contenant pas d'informations déclaratives sur les propriétés métriques mais servant à l'exécution de tâches complexes. Parmi les tâches complexes que permet ce type de modèle, nous pouvons citer la prise de perspective, la réorientation ou

encore l'inférence (Tversky, 1993). Le modèle mental spatial permet l'inférence de n'importe quelle perspective à partir de la configuration structurelle du lieu (Tversky, 1991), se distinguant ainsi des images mentales par exemple. Ce type de modèle est particulièrement adapté au traitement de sources d'informations spatiales verbales (Bryant & Tversky, 1992; Bryant, Tversky, & Franklin, 1992) mais peut également provenir de l'apprentissage spatial par schémas ou par expérience en milieu réel (Tversky, 2003). Toutefois la construction du modèle mental spatial ne peut se faire que si la source d'information spatiale est cohérente et bien intégrée (Denis & Denhière, 1990). Le modèle mental spatial est une construction «*occurrente*», c'est-à-dire qu'elle n'est pas stockée en mémoire à long-terme et peut donc évoluer, s'adapter en fonction des informations supplémentaires récoltées en temps réel (Grison & Gyselinck, 2019). Cependant, le modèle mental spatial peut s'enrichir à partir d'informations issues de la mémoire à long-terme (Gyselinck, Picucci, Nicolas, & Piolino, 2006).

La distinction entre collage spatial et modèle mental spatial illustre parfaitement un élément clé de notre argument : une seule représentation unitaire ne peut rendre compte de l'ensemble de l'information spatiale, de sa complexité et de sa diversité. La raison pour laquelle le collage spatial et le modèle mental spatial sont fonctionnellement distincts est que chacun est pertinent pour un type de tâche en particulier : par exemple l'apprentissage par navigation pour le collage spatial et l'apprentissage par descriptions propositionnelles pour le modèle mental spatial. Au cours de cette thèse nous nous intéresserons particulièrement à l'apprentissage par navigation, ce qui portera notre attention sur les collages spatiaux en particulier. Cependant nous avançons l'hypothèse que les différentes «*couches*» du collage spatial se constituent en rapport avec une situation donnée, selon une approche constructiviste mais aussi «*task-dependent*» (en rapport avec la tâche précise). Le fait que la tâche modifie les qualités de la représentation, et donc les performances spatiales qui en découlent, a été suggéré par plusieurs observations expérimentales.

2.2.3.2. *Une question de perspective(s) ?*

Parmi les paramètres de la tâche influençant les propriétés de la représentation et les performances, nous pouvons d'abord citer la perspective d'apprentissage et de récupération. Thorndyke et Hayes-Roth (1982) ont montré qu'apprendre un lieu non familier ouvert à grande échelle (extérieur d'un campus universitaire) par la navigation en milieu réel apportait de meilleurs résultats dans diverses tâches de mémoire spatiale que l'apprentissage par carte.

Cependant, Taylor, Naylor et Chechile (H. A. Taylor, Naylor, & Chechile, 1999) ont observé que si la tâche des participants était d'apprendre la structure des différentes pièces d'un bâtiment, l'apprentissage par carte était supérieur à l'apprentissage par navigation réelle. De plus, les individus ayant appris par navigation ont obtenu de meilleurs résultats à d'autres types de tâches, adaptées à leur mode d'exploration : prise de perspective et rappel de trajet (H. A. Taylor et al., 1999). La distinction opérée dans ces études est celle qui divise la perspective de traitement de l'information spatiale selon le format « route » et le format « survol ». La perspective « route » est dite égocentrée (vue à la première personne analogue à celle expérimentée durant la navigation) alors que la perspective « survol » est allocentrée (représentation de l'espace du dessus analogue à une carte).

De nombreux auteurs ont montré des effets de spécificité de l'encodage (Thomson & Tulving, 1973) identiques à ceux précédemment décrits entre les perspectives route et survol durant l'apprentissage et la récupération de l'information spatiale (G. W. Evans & Pezdek, 1980; Perrig & Kintsch, 1985; Sholl, 1987). Ces observations ont été répliquées sur le plan neuro-anatomique, puisque des circuits neuronaux différents ont été identifiés lors de l'étude d'un matériel spatial en perspective route et en perspective survol (Aguirre & D'Esposito, 1997) ; le circuit ayant été activé durant l'apprentissage étant plus significativement ré-activé durant la récupération (Shelton, Burrows, Tversky, & Gabrieli, 2000).

Cependant, il a été suggéré que des différences individuelles dans l'utilisation de ces perspectives (préférences pour une perspective) pouvaient également conduire à des variations de performances spatiales (Pazzaglia & De Beni, 2001; Pazzaglia & Taylor, 2007). Certaines études ont même montré que les individus étaient capables de créer des représentations spatiales sous différents types de perspectives (Iglói, Zaoui, Berthoz, & Rondi-Reig, 2009) mais aussi sous un format mixte flexible afin de sélectionner le cadre de référence spatial le mieux approprié à la tâche (H. A. Taylor & Tversky, 1992, 1996). De plus, lors de la création d'une représentation de survol, les individus semblent utiliser un cadre référentiel adapté à la tâche en cours en orientant leur représentation en fonction de la position du corps et de l'objectif (Meilinger, Frankenstein, Simon, Bühlhoff, & Bresciani, 2016), ou en fonction des points cardinaux (Gagnon et al., 2014). Enfin, lorsque les participants sont confrontés à un apprentissage spatial par le biais de maquettes représentant la structure tridimensionnelle de façon directe, ils ont tendance à utiliser une perspective égocentrée ; si l'apprentissage spatial se fait à travers l'utilisation de représentations

graphiques en deux dimensions (de type carte géographique), l'individu construit préférentiellement une représentation allocentrée (Bryant & Tversky, 1992, 1999). Toutefois le participant est capable de construire un type de représentation en particulier quel que soit le format d'apprentissage si la consigne le lui demande explicitement, sans que cela n'impacte significativement ses performances (Bryant & Tversky, 1999).

Ces résultats sont en accord avec une vision selon laquelle les individus seraient capables de manipuler l'information spatiale sous différentes perspectives, selon les buts et les demandes de la tâche à effectuer (Iglói et al., 2009; H. A. Taylor et al., 1999) ou selon la nature familière ou non de l'environnement (Meilinger, Frankenstein, & Bühlhoff, 2013).

2.2.3.2. *Une question d'échelle(s) ?*

Si la nature des représentations spatiales peut varier en fonction de la perspective, de nombreux auteurs se sont également intéressés à savoir si différents mécanismes cognitifs sont utilisés lors du traitement de l'information spatiale à différentes échelles. Ces échelles renvoient à des espaces fonctionnellement différents, variant donc en termes d'ampleur mais aussi en termes de possibilités d'interaction. Depuis les premières classifications contrastant les positions proximales et distales seulement (Sandström, 1951), plusieurs classifications ont été proposées, toutes choisissant comme critère taxonomique le statut fonctionnel de chaque espace en rapport au corps.

Montello (1993) par exemple définit trois espaces différents selon le mode d'acquisition de l'information (par le déplacement ou depuis un point de vue fixe). Ainsi il décrit l'espace *figural* et l'espace *vista* comme pouvant être appréhendés sans navigation, et l'espace *environnemental* dont les informations sont collectées par le déplacement (Montello, 1993). L'espace *figural* est un espace projectivement plus petit que le corps et comporte deux sous-espaces : l'espace des représentations graphiques et l'espace des objets. Cet espace peut contenir également des espaces plus étendus mais observés de loin (p. ex. un paysage), dont les propriétés peuvent alors être appréhendées sans déplacement. L'espace *vista* est plus grand que les limites du corps et correspond à l'échelle d'une pièce, d'un jardin ou d'un square par exemple. L'espace *environnemental* est quant à lui beaucoup plus étendu, implique la navigation et un investissement temporel afin de collecter et d'intégrer les informations spatiales, et concerne donc plutôt les bâtiments ou les villes. Montello rajoute à ces trois espaces un espace supplémentaire qu'il appelle l'espace *géographique*, qui ne peut être

appréhendé ni par l'observation ni par la navigation. Cet espace est celui des territoires, des pays ou des continents : il doit être appréhendé par le biais de cartes qui sont des réductions de l'espace géographique (ou environnemental) à l'espace figural.

Si la classification de Montello relie les différentes échelles à la manière dont les individus doivent récolter l'information spatiale, d'autres auteurs ont mis l'accent sur la relation physique entre le corps et son milieu. Une classification relativement similaire mais opérée selon les modes d'interaction avec les objets a été proposée par Previc (1998), qui a notamment identifié des substrats neuronaux distincts pour chacun des espaces décrits (quatre espaces partageant des caractéristiques communes à ceux décrits par Montello). Tversky (2003) propose quant à elle de distinguer l'espace du corps (disposition des segments corporels les uns par rapport aux autres) de l'espace *autour* du corps (objets disponibles à la perception et atteignables sans navigation), l'espace de la navigation et l'espace graphique (ou espace des représentations externes). Ces trois classifications (Montello, 1993; Previc, 1998; Tversky, 2003), bien que différant sur certains aspects, ont en commun une distinction primordiale : la séparation entre espaces péri-personnels (dans lesquels l'interaction motrice est possible sans navigation) et espaces extra-personnels, qui nécessitent la navigation pour collecter des informations et interagir avec les éléments constitutifs de l'espace (Coello & Bartolo, 2012; Coventry, 2012). Cette distinction n'existe pas *a priori* dans toutes les taxonomies de l'espace, mais sera utilisée ici car elle possède des implications fonctionnelles importantes sur le plan de l'interaction sensorimotrice avec l'environnement.

La distinction entre espaces péri-personnels et espaces extra-personnels est intéressante car comme chaque espace possède ses propres caractéristiques fonctionnelles, des différences devraient être observées dans les représentations spatiales créées pour chaque espace. Sur le plan cérébral par exemple, les tâches de rotation mentale appliquées sur de petits objets (espaces péri-personnels) impliquent le cortex pariétal (Kesner & Creem-Regehr, 2013) alors que l'apprentissage de lieux à grande échelle (espaces extra-personnels environnementaux) repose sur l'hippocampe et les cortex temporaux (Redish & Ekstrom, 2013). Sur le plan comportemental, des analyses factorielles ont montré à plusieurs reprises que les tâches spatiales effectuées dans des espaces réduits (péri-personnels) étaient fonctionnellement distinctes de celles réalisées dans des espaces à grande échelle impliquant la navigation (Allen, Kirasic, Dobson, Long, & Beck, 1996; Loomis et al., 1993). Cependant, les mécanismes de traitement recrutés dans les espaces péri-personnels et extra-personnels ne

sont pas totalement dissociés : dans un travail ayant pour objectif d'étudier l'apprentissage spatial de matériels issus des quatre espaces décrits par Montello (1993), Hegarty et collaborateurs (2006) ont pu montrer que les capacités utilisées dans la résolution de tâches spatiales inscrites dans des espaces à échelle réduite prédisaient les performances aux tâches inscrites dans des espaces à (grande échelle). Ces résultats suggèrent que les représentations spatiales ne sont pas construites à travers des formats et mécanismes unitaires, mais également que les différents espaces ne sont pas totalement indépendants les uns des autres sur ce point : il existerait des mécanismes communs entre le traitement de l'information spatiale péri-personnelle et extra-personnelle. Tel que l'interprète notamment Michel Denis (2018), les résultats obtenus par Hegarty et collaborateurs vont dans le sens d'une superposition partielle des aptitudes requises aux différents types de traitement spatial.

Cette idée d'une superposition partielle de capacités spatiales est compatible avec la métaphore des collages spatiaux de Tversky, chaque « couche » de la représentation étant à la fois structurellement différente des autres, mais également complémentaire dans la représentation du lieu cible. Il est notamment possible que, bien que le format de chaque couche diffère, le mécanisme cognitif permettant l'accès aux différents formats soit quant à lui transversal. Dans les approches situées et incarnées, c'est la simulation sensorimotrice qui remplirait ce rôle : chaque symbole perceptif intégré dans la représentation spatiale pouvant être incarné dans un cortex sensoriel ou moteur permettant la reviviscence de certains paramètres empiriques. Toutefois, si la simulation sensorimotrice a été largement étudiée dans le cadre de la mémoire sémantique ou des représentations abstraites (p. ex. simulation sensorimotrice, p. 58), peu de travaux en ont apporté des preuves empiriques dans le traitement de l'information spatiale à grande-échelle. Il s'agit ici d'un paradoxe puisque la mémoire spatiale chez l'humain prend racine dans l'expérience empirique de l'individu dans son milieu, où la composante sensorimotrice revêt une importance particulière (affordances, locomotion...). Pourtant nous ne disposons actuellement pas de preuves directes de l'existence de mécanismes de simulation sensorimotrice intégrés à la représentation de l'espace. Or, cet argument précis est nécessaire à la défense d'une approche située et incarnée de la représentation spatiale, qui ne fait aujourd'hui pas l'unanimité. Nous allons donc nous attacher à partir de maintenant à décrire les indices comportementaux nous permettant de penser que les représentations sensorimotrices sont impliquées dans le traitement cognitif de l'espace. Nous tenterons de structurer les arguments en faveur du rôle du corps dans la représentation spatiale, avant de proposer de nouveaux arguments expérimentaux collectés

dans le cadre de cette thèse, en ciblant particulièrement le rôle des composantes sensorimotrices sur les propriétés de la représentation.

2.2.4. En résumé : la cognition au service du corps, entre réductionnisme et complexification du réel

Cette deuxième partie était consacrée aux approches écologiques de la cognition ayant chronologiquement succédé à l'approche computationnelle cognitive. En premier lieu, nous avons décrit l'approche princeps de Gibson (1979) et sa théorie écologique de la vision. Ces travaux phares pouvant être considérés comme à l'origine de notions centrales en sciences cognitives, telles que la perception pour l'action et le concept d'affordances. En cela Gibson est souvent considéré comme un père fondateur des approches modernes de la perception.

Nous avons ensuite présenté les nouvelles réflexions théoriques traitant de la nature des représentations, et en particulier la théorie des systèmes de symboles perceptifs de Lawrence Barsalou. Selon cette approche, les représentations ne sont plus stockées en mémoire sous un format amodal traduit depuis l'input perceptif décontextualisé : les stimulations sensorimotrices sont utilisées sous une forme analogique mais schématisées en mémoire afin de participer à la récupération de symboles perceptifs par le biais de simulations d'expériences sensorielles. La simulation de symboles modaux est alors une reviviscence des propriétés empiriques, dont les différentes itérations peuvent se combiner entre elles afin de faire émerger le concept dans sa dimension multimodale. En cela même les concepts abstraits ne disposant pas de substrat sensorimoteur direct peuvent émerger de la simulation par le biais de la métaphore. De l'aveu même de l'auteur de cette nouvelle théorie des représentations, il ne s'agit pas d'une réécriture totale de la théorie ayant précédé mais bien d'une proposition de synthèse entre les symboles amodaux décrits par le computationnalisme et les symboles modaux stockés dans des cortex sensorimoteurs.

Les implications de l'approche écologique de Gibson (1979) et des symboles perceptifs de Barsalou ont ensuite été décrites par le biais d'arguments en faveur d'une vision située (inscrite dans un contexte environnemental) et incarnée (inscrite dans un contexte lié au corps) de la cognition. L'idée résumée dans cette partie était que la cognition ne peut être considérée comme une entité indépendante puisqu'elle n'existe que dans l'interaction avec un contexte (son milieu, et son corps). Nous avons pu ainsi mentionner le statut des extensions

cognitives, éléments de l'environnement intégrés dans les processus de pensée pouvant notamment servir de support minimisant les ressources de traitement à dépenser dans l'exécution d'une tâche. Nous avons également mentionné le point de vue de Glenberg (1997) sur la mémoire dédiée à l'action, puis les théories de l'énaction.

Enfin nous avons présenté dans quelle mesure les approches écologiques de la cognition pouvaient apporter de nouveaux éléments de compréhension au traitement de l'information spatiale. En opposition avec les concepts de cartes cognitives et schémas topologiques, une nouvelle métaphore rendant compte de la richesse de la représentation spatiale a été décrite selon les travaux de Barbara Tversky : le collage spatial. Selon cette conceptualisation de la représentation spatiale, plusieurs niveaux de connaissances sont construits par l'interaction avec le lieu, chaque niveau étant constitué d'un format de représentation différent, enrichi d'une variété de modalités sensorimotrices. Nous avons insisté sur la nature constructiviste de ce type de modèle, et ses qualités fonctionnelles : différentes couches de la représentation étant adaptées à différentes tâches, différents buts, différentes échelles et perspectives. Cette partie s'est terminée par une description de l'adaptation des modèles mentaux de Johnson-Laird au traitement de l'information spatiale.

L'idée générale de ce chapitre a été de montrer que la cognition ne peut exister qu'en interaction avec le milieu et le corps. Ce type d'approche présente un intérêt particulier dans l'évolution de la pensée humaine : les approches écologiques de la cognition contribuent à l'idée que la pensée n'est pas le pinacle de la nature humaine, mais un organe servant à programmer l'action. Ainsi plus de 400 ans après le dualisme et le rationalisme cartésien, le réductionnisme phylogénétique réintroduit par les approches situées et incarnées de la cognition replacent la pensée comme un appendice du corps ; la cognition au service de la survie, en interaction avec le milieu et guidé par le corps dans le but de permettre à l'espèce de perdurer. L'importance donnée à la perception ou à l'action dans les approches situées et incarnées conduisent à repenser le statut autrefois si particulier de l'intelligence, dont les définitions modernes tendent à faire disparaître la spécificité humaine : celle de Sternberg en est un parfait exemple, puisqu'il considère l'intelligence comme la cause d'un comportement destiné à sélectionner un milieu environnemental, s'y adapter correctement et le modifier (Sternberg, 1988). On voit dans cette définition le changement de paradigme opéré par la naissance de nouvelles approches écologiques : la cognition ne serait plus la machine computationnelle décrite par la tradition cognitiviste, mais elle pourrait s'étayer sur les

processus de « bas niveau » liés au comportement moteur afin de répondre correctement aux demandes de son milieu. En cela il est aisé de comprendre pourquoi les approches écologiques de la cognition ont mis autant de temps à s'installer durablement : le retour au comportement comme objet d'attention de la recherche pouvant facilement être confondu avec le paradigme béhavioriste.

Toutefois bien que ce retour aux interprétations perceptivo-motrices et évolutionnistes puissent s'assimiler à une forme de réductionnisme, il s'agit aussi à l'opposé d'une complexification de la pratique des sciences cognitives : l'assimilation des contextes environnementaux et corporels à la cognition implique la multiplication des sources de variation possibles. Le comportement n'est plus la cause de la seule pensée : il découle d'un processus complexe d'adaptation et de compromis entre les traitements computationnels et les états complexes du corps et du milieu. Cette réflexion est responsable de l'élaboration de théories intégratives complexes, dont nous pouvons nous demander si elles parviennent à expliquer l'organisation du réel sous une structure empiriquement intelligible. C'est en cela qu'il nous semble primordial de restructurer l'argument des théories situées et incarnées de la cognition dans un cadre positiviste plus strict : quelle est la contribution spécifique et systématique d'un type de contexte sur un type de traitement ?

En ce qui concerne notre objet d'étude particulier, il est aisé d'adopter un point de vue trop radicalement constructiviste en admettant que tout ce qui peut participer à l'expérience d'un lieu peut contribuer à n'importe quelle dimension de la représentation. Toutefois cet argumentaire ne satisfait pas aux exigences de la méthode scientifique, car sa généralité le rend impossible à invalider. De plus, le caractère didactique d'une telle affirmation n'a aucune portée puisqu'elle n'explique rien de concret. Ainsi, nous choisissons dans cette thèse de défendre une idée simple et empiriquement vérifiable : les informations sensorimotrices ne contribuent que de façon ciblée à la représentation spatiale en mémoire, en servant de modulateur des propriétés métriques globales du lieu.

2.3. CONTRIBUTION SPECIFIQUE DES INFORMATIONS SENSORIMOTRICES A LA PERCEPTION ET AUX REPRESENTATIONS DE L'ESPACE

Si les informations sensorimotrices participent à la perception et aux représentations de l'espace, les éléments constituant l'environnement doivent être intégrés en tant que cibles d'interaction potentielles avec le corps. Ceci implique que les objets ou les propriétés physiques de l'espace sont catégorisés en temps réel durant la perception, selon les actions qu'ils suggèrent d'eux-mêmes (leur utilisation par exemple, ou les conséquences de leur utilisation sur l'état du corps). On parle ainsi d'un processus de catégorisation spatiale de l'espace, qui s'effectue en mettant en lien des informations perceptives et des représentations sensorimotrices en mémoire, issues de l'expérience. Parmi les modèles traitant de catégorisation spatiale sensorimotrice, nous nous baserons sur les travaux de Coello et Delevoeye-Turrell (2007) pour définir le processus de catégorisation et de simulation lors du traitement de l'information spatiale. Nous nous appuyerons également sur l'approche *action-specific* de Proffitt (2006), expliquant les distorsions observées lors de la catégorisation de l'espace par un biais de jugement lié à l'économie des coûts énergétiques lors de la perception initiale.

2.3.1. Catégorisation spatiale et représentations sensorimotrices

2.3.1.1. *Le modèle de Coello & Delevoeye-Turrell*

Si l'environnement est perçu selon les possibilités d'action qu'il offre (Gibson, 1979), alors il doit exister un processus de catégorisation des éléments de l'espace en fonction des capacités du corps. La façon dont l'environnement et le corps sont intégrés dynamiquement dans la représentation spatiale est donc comprise par le biais de modèles théoriques expliquant les boucles perception-action dans le processus de catégorisation spatiale. Le modèle que nous choisissons d'adopter ici est le modèle des corrélats neuro-anatomiques de Coello et Delevoeye-Turrell (Coello & Delevoeye-Turrell, 2007). Ce modèle résume clairement comment l'influx perceptif et l'action peuvent modifier les simulations en s'étayant à la fois sur des arguments comportementaux et neuro-anatomiques. De plus, il avance des hypothèses sur les causes de l'état de conscience motrice ou perceptuelle. Ce modèle intègre enfin efficacement les différents aspects situés et incarnés de la cognition que nous avons discutés précédemment, il est également compatible avec la théorie des systèmes de symboles perceptifs (Barsalou, 1999) et permet de comprendre comment les éléments de l'espace peuvent être catégorisés lors de la construction d'un éventuel collage spatial (Tversky, 1993).

Ainsi selon Coello et Delevoeye-Turrell (2007), la perception et la catégorisation de l'espace est contrainte par la programmation d'actions du corps selon le recrutement de représentations sensorimotrices. L'idée générale est que la perception de l'espace se transforme au fur et à mesure du comportement grâce au retour sensoriel obtenu à partir des interactions physiques. Les auteurs divisent ce processus en trois phases (voir *Figure 5*). La première phase est la phase dite « d'état intentionnel », durant laquelle des intentions et hypothèses (*priors*) sont appliquées à l'objet de la perception, qui lui-même suggère des capacités d'action (*affordances*). Affordances et intentions sont intégrées pour participer à l'élaboration d'une seconde étape, appelée « état pré-réflexif ». Dans cet état du système, la planification de l'action est générée selon un processus inverse (en fonction des représentations sensorimotrices déjà encodées par l'expérience passée) et conduit à l'efférence motrice, la commande neuronale à destination des muscles concernés. En parallèle, une copie de cette efférence est générée à destination des centres moteurs, en accord avec les théories classiques des modèles internes sur le contrôle moteur (p. ex. Francis & Wonham, 1976; Jordan, 1995). Selon Coello et Delevoeye-Turrell, cette copie de l'efférence est spécialement responsable de la simulation sensorimotrice : elle sert à émuler l'acte moteur, et permet donc de prédire l'état sensoriel attendu comme conséquence du mouvement. La simulation telle que décrite lors de la phase pré-réflexive est absolument conforme à l'idée de reviviscence sensorimotrice analogique (Barsalou, 1999) : elle possède toutes les propriétés d'une action ouvertement effectuée à l'exception du dépassement du seuil d'excitabilité neuronal responsable de la contraction musculaire et de l'activité articulaire (Jeannerod, 2003). En parallèle, l'efférence motrice aboutit quant à elle aux effecteurs et permet l'exécution de l'action, qui aboutit à une conséquence visible sur l'environnement. Il s'agit de la dernière phase, dite « d'état réflexif », puisque l'action effective produit un feedback proprioceptif (responsable de la conscience motrice) et la conséquence (transformation de l'environnement) génère un feedback visuel sur l'état réel du système (intégré à l'état attendu produit d'après la simulation pour générer la conscience perceptive). La phase d'état réflexif aboutit alors à la catégorisation spatiale, qui permet d'établir une boucle vers un nouvel état intentionnel en modifiant les buts et hypothèses vis-à-vis de l'élément spatial catégorisé. L'état réflexif modifie ainsi les intentions de l'organisme mais permet également la modulation des affordances par l'expérience.

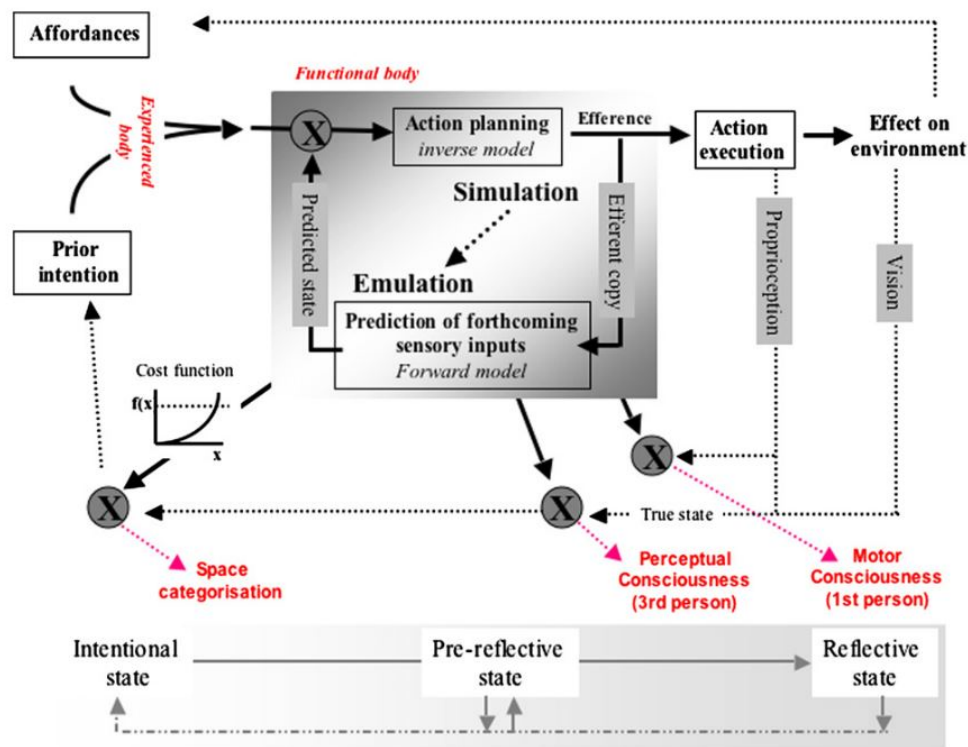


Figure 5 - Représentation graphique du modèle des corrélats neuro-anatomiques (tiré de Coello & Delevoye-Turrell, 2007, p. 680)

L'un des points cruciaux de ce modèle dans la présente thèse est la copie de l'efférence comme une simulation interne. Cette simulation est bien présentée comme fonctionnellement intégrée aux contraintes du corps : elle sert à juger de la faisabilité des potentiels d'action offerts par l'environnement. En cela le modèle de Coello et Delevoye-Turrell semble particulièrement cohérent avec les postulats du *predictive-coding* [codage prédictif] (Friston, 2005; Rao & Ballard, 1999). Les théories du codage prédictif considèrent en effet la perception comme un processus de vérification d'hypothèses (Gregory, 1980). Selon cette approche, des attentes (*priors*) sont formées à partir de l'expérience empirique afin de servir à l'élaboration de prédictions. Ces prédictions servent notamment à expliquer au système comment les sensations lui parviennent ; l'organisme vise donc continuellement à minimiser l'erreur de prédiction proprioceptive dans le cadre de la catégorisation spatiale (Friston, 2012). Nous reviendrons sur les implications des théories du codage prédictif à l'occasion de la troisième étude de cette thèse.

2.3.1.2. *L'approche « action-specific » et l'économie de l'action*

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'apprentissage spatial bien que fonctionnellement complexe fut certainement originellement dédié à des finalités extrêmement simples : trouver un abri, trouver de la nourriture et de l'eau, retrouver le chemin de son abri... Nous pouvons résumer cette idée en disant que le traitement de l'information spatiale est un processus dit de « haut-niveau » au service des processus dits de « bas-niveau », dédiés à la survie du corps. Ainsi, en raison de sa complexité, la fonction évolutionniste de l'apprentissage spatial a été longtemps négligé avant d'être réintroduite progressivement, puis intégrée dans les modèles théoriques à l'image de celui de Dennis Proffitt : *l'action-specific account on perception*.

Selon Proffitt (2006), la perception de l'espace est dirigée vers l'action mais modulée par le *principe d'économie* : si pour survivre un organisme doit dépenser moins d'énergie que ce qu'il consomme, alors la consommation d'énergie doit être optimisée par l'économie comportementale (Krebs & Davies, 1993). Ceci signifie que les coûts et bénéfices associés à chaque action doivent être intégrés à la boucle perception-action décrite précédemment (Coello & Delevoeye-Turrell, 2007) afin de sélectionner des actions permettant d'optimiser la récompense en diminuant le coût énergétique. Ainsi le coût énergétique peut être vu comme une ressource [*currency*] (Krebs & Davies, 1993) modulant directement la perception visuelle (Proffitt, 2006). Par exemple, des participants placés devant une pente montante ont tendance à surestimer le degré d'inclinaison de celle-ci (Proffitt, Bhalla, Gossweiler, & Midgett, 1995; Proffitt, Creem, & Zosh, 2001, voir *Figure 6*), et ce d'autant plus que les participants sont fatigués (Eves, Thorpe, Lewis, & Taylor-Covill, 2014; Proffitt et al., 1995; Taylor-Covill & Eves, 2014), et en surpoids (Taylor-Covill & Eves, 2016) ou âgés (Bhalla & Proffitt, 1999). De plus, la surestimation des pentes montantes est plus importante si le participant est équipé d'un sac-à-dos pesant (Bhalla & Proffitt, 1999) ou si une résistance supplémentaire est appliquée à la marche sur tapis roulant (Creem-Regehr, Gooch, Sahm, & Thompson, 2004). Il est important de préciser que cette surestimation de l'inclinaison n'est observée que lorsque les pentes peuvent être gravies, et disparaît lorsque l'inclinaison ne permet plus la locomotion (Proffitt et al., 1995). A l'inverse, augmenter artificiellement les ressources énergétiques disponibles en augmentant la concentration de glucose dans le sang (par l'ingestion d'une boisson) conduit à sous-estimer le degré d'inclinaison des pentes (Schnall, Zadra, & Proffitt, 2010).

Ces résultats montrent dans leur ensemble que les estimations visuelles varient en fonction de la disponibilité du potentiel physiologique pour l'action. Cet effet est interprété par Proffitt comme une preuve du couplage entre l'information visuo-spatiale et l'état du sujet percevant dans sa planification d'actions : la surface présentée aux participants afforderait la locomotion et stimulerait la pré-programmation d'un mouvement de marche. Si des indices visuo-spatiaux ou internes impliquent un coût énergétique plus important que la moyenne (ici la pente montante, la fatigue, ou l'effort physique supplémentaire), alors la perception s'ajustera afin d'inciter l'organisme à adopter des comportements d'évitement de l'effort physique non optimisé. Ainsi la surestimation visuelle de l'inclinaison d'une pente réduirait la probabilité de sélection de comportements trop coûteux.



Figure 6 - Participante estimant le degré d'inclinaison d'une pente à l'aide d'un dispositif haptique (tiré de Proffitt, 2006, p. 112)

Selon Proffitt l'espace au sol afforde la locomotion et est défini par deux paramètres, l'orientation et l'étendue. Nous avons pu constater que la perception de l'orientation verticale

était biaisée par les coûts métaboliques anticipés, et ce grâce à des protocoles d'estimations d'inclinaisons de pentes. De nombreux travaux ont également été réalisés sur l'étendue de la surface, montrant que les coûts métaboliques étaient également intégrés dans la perception des distances. Nous reviendrons sur ces arguments expérimentaux en détail dans une prochaine partie (voir p. 99) dédiée à montrer que les biais liés à l'intégration de coûts physiques sur l'estimation des distances peuvent influencer les propriétés de la représentation spatiale.

Globalement, l'idée la plus intéressante de l'approche de Proffitt dans le cadre de cette thèse est que le sol suggère par lui-même la locomotion (qui renvoie à son utilisation motrice), et que la programmation de cet acte moteur contenu dans la vision (selon une perspective écologique) peut se trouver biaisée par le principe d'économie d'action. Ce postulat a une conséquence particulière concernant la question de la représentation mentale, puisqu'il implique que manipuler les coûts énergétiques réels ou anticipés devrait conduire à des biais perceptifs lors de l'apprentissage spatial. Il est alors très probable que ces biais sont intégrés dans les propriétés de la représentation spatiale, puisque celle-ci se construit à partir de l'expérience empirique de l'individu dans le milieu (Tversky, 1993). Cependant avant de vérifier cette hypothèse, il nous faut d'abord montrer que la locomotion peut influencer les paramètres de la mémoire spatiale selon une approche située et incarnée. Ce problème a été abordé dans un champ d'étude particulier contrastant l'apprentissage spatial actif et passif.

2.3.2. Apprentissage spatial actif/passif

2.3.2.1. Définitions et activité idiothétique

Dans une étude précédemment mentionnée, Thorndyke et Hayes-Roth (1982) ont montré que l'apprentissage par navigation réelle conduisait à de meilleures performances de rappel spatial que l'apprentissage par cartes. Plus précisément, l'apprentissage par navigation est considéré par ces auteurs comme fournissant une représentation de l'espace en quatre dimensions (incluant donc la dimension temporelle), permettant aux participants de produire des jugements de directions et de temps de trajet avec plus de précision. A la suite de cette étude se sont posées des questions sur les paramètres de la navigation, notamment : est-ce l'information visuelle sous un format égocentré qui facilite l'apprentissage spatial lors de la

navigation, ou est-ce l'activité spécifique de l'individu (locomotion, prise de décision, ou allocation attentionnelle par exemple) ?

Ainsi s'est développé un champ de recherche investiguant les différences entre ce que les auteurs ont appelé l'apprentissage « actif » et l'apprentissage « passif ». Selon Chrastil et Warren (2012), l'apprentissage spatial actif peut être considéré comme une condition d'apprentissage par la navigation pour laquelle au moins l'une des cinq composantes suivantes est mobilisée :

- 1) Des commandes motrices efférentes déterminant le mouvement et le chemin emprunté durant la navigation
- 2) Des afférences proprioceptives et vestibulaires consistant en un retour sensoriel sur le mouvement effectué
- 3) L'allocation de ressources attentionnelles sur les caractéristiques spatialement pertinentes de l'environnement
- 4) La prise de décision cognitive concernant les choix d'itinéraires
- 5) La manipulation mentale en temps réel de l'information spatiale

Ces cinq composantes peuvent ensuite être regroupées en une simple dichotomie séparant l'activité physique (composantes 1 et 2) de l'activité cognitive (P. N. Wilson, Foreman, Gillett, & Stanton, 1997). Plusieurs observations semblent indiquer que l'activité cognitive et en particulier la prise de décision durant l'apprentissage améliore globalement le rappel spatial chez l'enfant (Hazen, 1982) ou chez l'adulte (Voss, Gonsalves, Federmeier, Tranel, & Cohen, 2011; pour une revue voir Chrastil & Warren, 2012). Cependant nous ne nous intéresserons ici qu'à l'effet de l'activité physique lors de la construction de représentations spatiales, afin de déterminer si et comment la disponibilité d'indices liés au corps peut influencer la qualité de la représentation construite lors de l'apprentissage.

Les indices liés au corps dont il est question ici sont le plus souvent rassemblés sous le terme d'*informations idiothétiques* : l'ensemble formé par les efférences motrices et les réafférences proprioceptives et vestibulaires durant la navigation (Mittelstaedt & Mittelstaedt, 2001). Les informations idiothétiques correspondent à toute information sensorimotrice extraite de n'importe quel mode de déplacement mobilisant une activité motrice : marche à pied, conduite automobile, utilisation d'un fauteuil roulant, etc. Dans une étude princeps, Péruch, Vercher et Gauthier (1995) ont cherché à observer la contribution des informations

idiothétiques lors de l'apprentissage spatial en présentant à des participants des environnements virtuels inconnus, que ceux-ci pouvaient soit explorer en naviguant au moyen d'un joystick, ou en regardant une vidéo de quelqu'un se déplaçant dans l'environnement, soit enfin en regardant un diaporama d'images issues de l'environnement. A la fin de la phase d'apprentissage, les participants devaient se déplacer directement dans l'environnement depuis un point de départ vers un des points de repères vus durant l'apprentissage (p. ex. « cube jaune ») en prenant le chemin le plus court possible. Les résultats de cette étude montrent que les participants « actifs » (ayant appris le lieu en se déplaçant *via* le joystick) génèrent des trajets plus courts que les participants ayant appris par vidéo, qui sont eux-mêmes plus performants que ceux ayant visionné des images. Malgré quelques études reproduisant ce résultat avec d'autres modes de déplacement tel que le clavier (p. ex. Farrell et al., 2003), de nombreux auteurs ne sont pas parvenus à répliquer l'effet de l'activité idiothétique montré par Péruch, Vercher et Gauthier (Christou & Bühlhoff, 1999; Gaunet, Vidal, Kemeny, & Berthoz, 2001; P. N. Wilson et al., 1997; P. N. Wilson & Péruch, 2002).

Ces résultats contradictoires semblent suggérer que les périphériques informatiques traditionnels tels que les joysticks ne sont pas adaptés à l'étude de l'apprentissage actif. Ces périphériques sont symboliques : ils simulent un mouvement sous un format non analogue au mouvement habituel humain. Or, l'expérience empirique des individus avec le contexte spatial se fait habituellement par le biais d'une activité physique particulière : la locomotion bipédique. Ainsi les travaux sur l'apprentissage physique actif se sont plutôt intéressés à l'apport d'un type spécifique d'information idiothétique : les informations *podokinétiques* (Weber, Fletcher, Gordon, Melvill Jones, & Block, 1998), qui correspondent spécifiquement à la commande motrice et son retour proprioceptif durant la marche uniquement.

2.3.2.2. *Contribution des informations podokinétiques*

Grant et Magee (1998) ont comparé l'apprentissage d'un lieu réel exploré par la marche, à l'apprentissage d'une réplique de ce lieu en réalité virtuelle, soit exploré en marchant physiquement à l'aide d'un tapis monodirectionnel, soit exploré en contrôlant le déplacement de la caméra à l'aide d'un joystick. Afin de réduire l'effet de l'activité cognitive en lien avec la prise de décision, l'itinéraire d'apprentissage était imposé et le participant devait simplement suivre les indications de l'expérimentateur. Les participants étaient ensuite testés en situation réelle par une tâche d'orientation au cours de laquelle ils devaient trouver

des objets disséminés dans l'environnement. Les résultats de cette étude montrent que les participants ayant marché en situation de réalité virtuelle ont trouvé les objets plus rapidement que ceux ayant utilisé un joystick, en générant des trajets plus courts (voir aussi Chance, Gaunet, Beall, & Loomis, 1998). Toutefois les performances des participants ayant marché dans l'environnement réel sont toujours supérieures aux performances des participants ayant marché en situation de réalité virtuelle. Les auteurs interprètent la différence de performance entre marche réelle et marche virtuelle par de multiples biais visuels : les participants ayant marché en situation de réalité virtuelle ont pâti d'un champ de vision réduit et non stéréoscopique, ainsi que d'une qualité d'images en basse résolution ne correspondant pas à l'acuité visuelle normale (Grant & Magee, 1998).

Afin d'éclairer la question du contrôle de l'information optique, on a par exemple montré que des participants aveugles ou voyants mais dont les yeux ont été bandés étaient capables d'estimer précisément des distances à partir de la seule disponibilité des informations podokinétiques lors de la marche (Afonso et al., 2010; Klatzky, 1998) ; ceci suggérant que l'expérience visuelle n'est pas la seule composante responsable de la construction des représentations spatiales (Loomis et al., 1993). Dans une situation plus conventionnelle, Waller et Greenauer (2007) ont quant à eux choisi de contraster l'apprentissage de lieux réels par la marche, à un apprentissage similaire sur le plan visuel et vestibulaire mais sans mobilisation de la marche (fauteuil roulant avec champ de vision rehaussé pour atteindre la même hauteur que les participants marchant debout, voir *Figure 7*). Les participants devaient ensuite pointer la direction de certains objets depuis leur position actuelle (mesure de l'erreur angulaire de pointage) et estimer la distance les séparant de ces objets. Les résultats montrent que la marche facilite les performances en pointage et estimation de distances (en l'absence de différences visuelles donc), seulement pour les essais dans lesquels les objets étaient séparés par de longues distances et par un grand nombre de virages (Waller & Greenauer, 2007). Cependant la structure de l'environnement utilisé dans cette étude était simple (couloir avec moins de dix virages) et situé à l'intérieur d'un bâtiment. Il est possible que la contribution des informations podokinétiques à la représentation spatiale ne soit observée que pour les environnements complexes et à grande échelle, ceux pour lesquels la locomotion est réellement nécessaire et pertinente, en accord avec les subdivisions fonctionnelles de l'espace proposées par Montello (1993), Previc (1998) ou encore Tversky (2003).

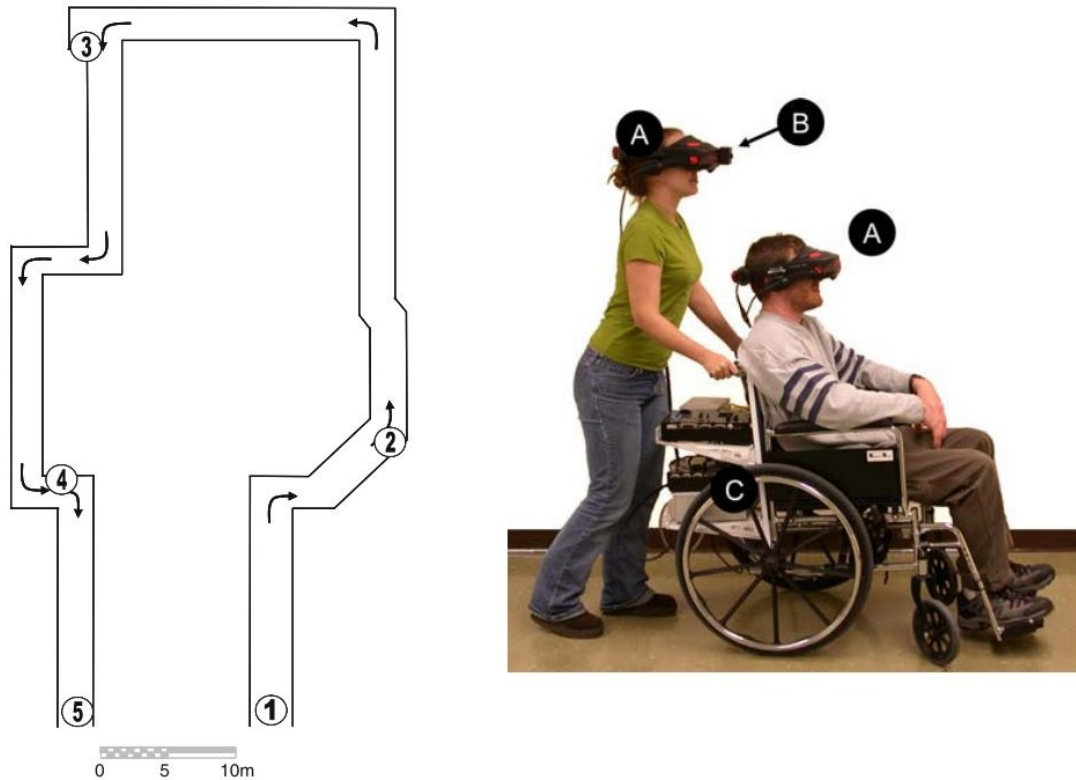


Figure 7 - A gauche, plan du lieu appris par les participants dans l'expérience de Waller et Greenauer (2007), avec points de repères signalés par des chiffres. A droite, matériel utilisé pour maintenir constante l'information visuelle tout en manipulant la disponibilité des informations podokinétiques : le participant assis dans le fauteuil roulant (C) voit dans le dispositif optique (A) ce que voit le participant debout grâce à une caméra (B) portée par celui-ci (tiré de Waller et Greenauer, 2007, p. 326)

En effet, de nombreux travaux ont montré un effet facilitateur de l'information podokinétique sur les performances spatiales seulement lorsque l'environnement appris est dans l'espace environnemental à grande échelle (Chrastil & Warren, 2013; Ruddle, Volkova, & Bühlhoff, 2011; Ruddle, Volkova, Mohler, & Bühlhoff, 2011; Waller, Loomis, & Haun, 2004), cet effet disparaissant pour les environnements plus petits contenus dans l'espace *vista* (Montello, 1993). De plus, la facilitation de l'apprentissage spatial par la disponibilité d'informations podokinétiques disparaît lorsque l'environnement est trop facile à apprendre (Chance et al., 1998; Mellet et al., 2010; Waller & Greenauer, 2007) et que la vision seule suffit à construire une représentation efficace du lieu. Les environnements à grande échelle nécessitant de se déplacer pour construire la représentation spatiale, il a donc été suggéré que l'information podokinétique pouvait contribuer à l'actualisation de la position dans l'espace

(*spatial updating*), en conjonction avec le flux optique (Riecke, van Veen, & Bühlhoff, 2002; Rieser, Guth, & Hill, 1986; Tcheang, Bulthoff, & Burgess, 2011). Toutefois, Ruddle et Lessels (2009) ont montré que les participants ayant marché physiquement durant l'apprentissage obtenaient de meilleurs résultats en recherche d'itinéraire que ceux ayant utilisé un joystick pour avancer tout en tournant physiquement leur corps : il semble que les composantes translationnelles (mouvement monodirectionnel et vitesse de marche) et rotationnelles (informations vestibulaires synchronisées avec le flot optique) soient fonctionnellement différentes dans l'apprentissage spatial. Ainsi selon Ruddle et Lessels (2009) la composante translationnelle aide à l'actualisation de la position en mémoire, mais d'autres auteurs soutiennent que la simple rotation suffirait à assurer cette fonction (Riecke et al., 2010). Riecke et collaborateurs (2010) observent tout de même que l'ajout de la composante podokinétique translationnelle réduit la distance parcourue lors d'une tâche de recherche d'itinéraire. Enfin Ruddle, Volkova et Bühlhoff (2011) ont fait marcher des participants sur un tapis roulant omnidirectionnel (translations et rotations) ou linéaire (translations seulement) et n'ont observé aucune différence entre ces deux types de contributions podokinétiques lors de tâches d'estimations de temps et de distance à grande échelle. Les auteurs concluent que l'information podokinétique motrice et proprioceptive est essentielle à l'encodage de représentations égocentrées ou allocentrées, alors que l'information rotationnelle vestibulaire isolée n'y contribue que marginalement et peut être remplacée par la vision seule (Ruddle, Volkova, & Bühlhoff, 2011).

2.3.2.3. *Représentation multimodale ou activité physiologique ?*

Il semble que l'apprentissage spatial actif sur le plan podokinétique produise de meilleures performances à l'ensemble des tâches spatiales que l'apprentissage passif. Une interprétation de ce phénomène dérivée des théories situées et incarnées de la cognition est que si les représentations spatiales sont multimodales (Tversky, 1993, 2003, 2009), alors la disponibilité d'informations podokinétiques durant l'apprentissage devrait enrichir la représentation. Ainsi la représentation devrait disposer de multiples sources de récupération et devrait être plus facilement rappelée, avec plus de précision. Donc, les informations podokinétiques contribueraient au format de la représentation spatiale parce qu'elles sont pertinentes pour décrire l'expérience de la connaissance spatiale. Cette idée est notamment clairement exprimée dans la théorie globale de l'*intentional weighting*, formulée par Bernhard Hommel et Jiska Memelink (Hommel, 2017; Memelink & Hommel, 2013) : lors de l'exécution d'une

tâche complexe (apprentissage d'un lieu à grande échelle ici), des mécanismes de contrôle cognitif attribuent plus de poids aux caractéristiques empiriquement vécues, ce qui expliquerait pourquoi les informations podokinétiques sont intégrées dans la représentation et facilitent le traitement spatial.

Cependant, il peut exister des explications alternatives à ce phénomène, indépendantes de la contribution spécifique des informations podokinétiques aux représentations spatiales. Par exemple, une portion de ces effets pourrait être attribuable à un simple effet d'*enactment* (ou *self performed task effect*, R. L. Cohen, 1981) : effectuer des actions durant l'apprentissage pourrait servir de stratégie d'encodage élaborative augmentant les performances de rappel ultérieures. Il s'agirait donc d'un simple effet d'apprentissage « participatif » augmentant la mobilisation de ressources attentionnelles par exemple, ou contribuant à un niveau d'encodage plus « profond » (Craik & Lockhart, 1972). Qui plus est, il existe également une interprétation non cognitive à la contribution des informations podokinétiques lors de l'apprentissage actif : l'activité physique pourrait contribuer à un état d'éveil physiologique généralisé, augmentant directement l'efficacité du rendement cardio-vasculaire et respiratoire (Bergh & Ekblom, 1979; Chwalbinska-Moneta & Hanninen, 1989). Cette hypothèse de l'éveil physiologique est soutenue par de nombreuses observations expérimentales : l'activité physique correctement dosée en termes d'intensité et de fatigue permettrait d'améliorer les performances à diverses tâches de mémoire (Madan & Singhal, 2012; Tomporowski, 2003). Ceci s'explique notamment par les conséquences de l'activité physique sur le métabolisme du cerveau : augmentation du débit sanguin dans le cortex (Dinoff, Herrmann, Swardfager, & Lanctôt, 2017) et augmentation de la concentration de neurotransmetteurs (Maddock, Casazza, Fernandez, & Maddock, 2016). De plus, on a pu montrer que marcher durant l'apprentissage d'une liste de mots augmentait les performances de rappel subséquentes, et ce sans que les participants soient conscients de l'augmentation de leurs performances cognitives (Salas, Minakata, & Kelemen, 2011). Enfin, l'éveil physiologique obtenu après un échauffement physique peut également être responsable de biais perceptifs spatiaux tels que la sous-estimation des distances (Proffitt, 2006; Riener, 2005), ce qui suggère une relation complexe entre éveil physiologique et traitement de l'information spatiale.

- *Question de recherche: Etude 1 de la thèse*

Malgré l'importance de la littérature sur le thème de l'apprentissage actif, nous disposons actuellement de peu d'éléments attestant de la contribution spécifique et fonctionnelle de

l'information podokinétique sur la représentation spatiale. A notre connaissance, aucune étude ne s'est attachée à départager l'effet de la marche comme expérience empirique pouvant enrichir la représentation, de l'effet de la marche sur l'éveil physiologique global pouvant faciliter les performances.

Ainsi nous nous proposons de répondre à une première question : les informations podokinétiques contribuent-elles à la construction de la représentation spatiale en mémoire ? Afin d'y répondre, nous allons dans une première étude observer l'effet de la marche sur une variété de tâches de mémoire spatiale : durant l'encodage de la représentation ou durant sa récupération. Ce type de protocole aura pour objectif d'opposer les deux hypothèses explicatives précédemment décrites : si marcher durant l'encodage (comparé à une condition contrôle sans marche) facilite les performances, mais que marcher durant la récupération n'a aucun effet, alors il est possible que les informations podokinétiques soient utilisées lors de l'encodage pour enrichir la représentation (apprentissage actif). Au contraire, si la marche lors de la récupération facilite autant les performances que durant l'encodage, alors nous devons rejeter l'hypothèse d'une contribution fonctionnelle des informations podokinétiques à la construction des représentations spatiales. Un tel résultat suggérerait alors que la marche facilite l'activité cognitive générale sans pour autant contribuer spécifiquement à la représentation en mémoire.

2.3.3. Imagerie mentale motrice et simulation sensorimotrice podokinétique

2.3.3.1. Paramètres de la marche imaginée

Si les informations podokinétiques participent à la construction de la représentation spatiale, alors un mécanisme de simulation sensorimotrice devrait pouvoir être observé lors de la récupération de l'information (Barsalou, 1999, 2008). Nous avons déjà discuté l'existence d'un tel mécanisme de simulation dans la récupération de représentations sémantiques et abstraites (voir p. 62), nous allons à présent décrire les quelques observations suggérant son existence dans le traitement de l'information spatiale.

La simulation sensorimotrice peut être décrite comme analogue à l'activité motrice réelle, mais sans envoi d'une commande motrice aux effecteurs (Jeannerod, 2003). En cela elle est considérée comme une représentation interne de programmes moteurs sans

mouvements réels, recrutant des réseaux neuronaux identiques à ceux impliqués dans la programmation de l'action (Jeannerod, 2001). Les mouvements simulés sont ainsi supposés partager les mêmes contraintes biomécaniques que les mouvements réels (Jeannerod, 1999; L. M. Parsons, 1994). La plupart des travaux se concentrant sur la simulation sensorimotrice de la marche spécifiquement ont utilisé un paramètre du mouvement de locomotion pour réunir des informations sur les paramètres de la simulation : la vitesse de marche, et donc les temps d'exécution des mouvements. Par exemple, on a montré que les temps requis pour imaginer des mouvements simples ou complexes étaient corrélés avec les temps d'exécution de mouvements réels (Decety, 1993; Decety & Michel, 1989; Macintyre, 1996), et que la vitesse de marche imaginée était elle aussi proche de la vitesse de marche réelle (Decety, Jeannerod, & Prablanc, 1989; Papaxanthis, Pozzo, Skoura, & Schieppati, 2002). Ces résultats illustrent un mécanisme de simulation motrice spécifique : l'imagerie mentale motrice, une forme consciente et intentionnelle de reviviscence motrice. Les travaux sur l'imagerie mentale motrice découlent des observations princeps de Kosslyn et ses collaborateurs : les temps d'étude d'un trajet sur carte sont corrélés avec la longueur du trajet (Kosslyn et al., 1978), ce qui suggère que les individus s'imaginent mentalement parcourir la distance (et donc possiblement simulent l'activité motrice de marche).

Ces travaux ont conduit à l'élaboration de la théorie de l'équivalence fonctionnelle (Kosslyn & Koenig, 1992), qui postule que l'imagerie mentale est fonctionnellement équivalente à la perception et préserve les propriétés motrices. Toutefois cette vision simplifiée de l'imagerie mentale a été contredite par plusieurs travaux en imagerie motrice, montrant des distinctions entre marche réelle et marche imaginée non observées auparavant. Dans une série d'expériences notables, Kunz, Creem-Reghr et Thompson (2009) ont demandé à des participants de mémoriser la position d'une cible spatiale dans un couloir, puis de marcher jusqu'à la position estimée de la cible les yeux bandés (marche aveugle), ou de s'imaginer marcher jusqu'à la cible les yeux fermés (marche imaginée). Dans les deux conditions, les participants devaient s'arrêter ou signaler leur arrêt une fois qu'ils pensaient avoir atteint la cible, et il était interdit d'utiliser des stratégies alternatives (comptage de pas par exemple). Dans ces conditions, les auteurs ne sont alors pas parvenus à répliquer les résultats précédents montrant une analogie précise entre marche réelle et marche imaginée (Decety et al., 1989; Papaxanthis et al., 2002) mais ont mis en lumière un biais systématique : la vitesse de marche imaginée semble toujours plus rapide que la vitesse de marche réelle (p. ex. Stevens, 2005). Kunz et collaborateurs (2009) ont donc démontré qu'en l'absence de

retour visuel, la vitesse de marche imaginée était systématiquement surestimée par rapport à la vitesse de marche réelle. Toutefois la relation entre temps et distance est respectée dans l'imagerie mentale motrice : il semblerait que l'équivalence fonctionnelle existe en termes de proportions et non en termes de vitesse absolue.

Afin de tester cette hypothèse, les auteurs s'appuient sur des paradigmes consistant en l'introduction d'une transgression de la relation entre vitesse du flux optique et informations podokinétiques. Cette transgression conduit à une adaptation de la distance marchée lors de tâches de marche aveugle (Rieser, Pick, Ashmead, & Garing, 1995), c'est-à-dire à un effet de recalibrage. L'idée générale est la suivante : si les participants ont utilisé la simulation sensorimotrice des informations podokinétiques pour réaliser la tâche de marche imaginée, alors il est possible de recalibrer la marche imaginée de la même manière que la marche réelle puisque la simulation est une réactivation corticale analogue à l'action réelle (Jeannerod, 2001). Kunz et collaborateurs ont utilisé un protocole en pré/post test : les participants devaient effectuer une première fois les tâches de marche aveugle et imaginée décrites précédemment, puis étaient confrontés à une phase de recalibrage durant laquelle ils devaient se déplacer dans un environnement virtuel pendant dix minutes en marchant physiquement sur un tapis roulant monodirectionnel. Durant cette phase, l'environnement virtuel pouvait visuellement défiler plus vite ou moins vite que la vitesse de marche, introduisant un recalibrage de la relation entre flux optique et informations podokinétiques pouvant s'effectuer dans les deux directions. Les participants devaient ensuite réaliser une seconde fois des tâches de marche aveugle et de marche imaginée. Tout comme la marche aveugle, la marche imaginée semble être affectée par le recalibrage, les temps de marche en post-test évoluant dans la direction prédite par les paramètres de la phase de recalibrage : si les participants sont habitués à un flux optique plus rapide que la normale, leur marche imaginée en post-test est plus rapide qu'en pré-test (et *vice versa* pour une habitude inverse). Ces résultats suggèrent que la marche imaginée est sous-tendue par des mécanismes de simulation sensorimotrice analogues à la marche réelle, et que la marche imaginée interagit avec les informations perceptives de la même manière que la marche réelle pour l'estimation des distances. Nous verrons dans une prochaine partie comment ce résultat s'intègre dans les approches centrées sur le principe d'économie d'action (Proffitt, 2006), afin de comprendre comment l'effort moteur peut être également utilisé pour recalibrer la simulation sensorimotrice et moduler la perception des propriétés métriques (p. ex. p. 99).

2.3.3.1. *Simulation sensorimotrice podokinétique durant l'encodage d'un matériel spatial*

Les individus ont recours à la simulation sensorimotrice podokinétique lorsqu'ils s'imaginent parcourir des distances en marchant. Mais ce mécanisme contribue-t-il à la représentation spatiale en mémoire, ou sert-il seulement de support pour l'estimation des distances immédiates ? Nous disposons de très peu d'arguments permettant de supposer que la simulation sensorimotrice podokinétique est intégrée à la représentation spatiale. Toutefois plusieurs études traitant de la lecture de textes spatiaux ont suggéré que les textes en perspective route (égocentrée) incitaient le lecteur à simuler mentalement des composantes perceptivo-motrices : par exemple, la composante visuo-spatiale de la mémoire de travail est affectée par une tâche concurrente lors de la lecture de textes en perspective route, mais dans une moindre mesure lors de la lecture de textes en perspective survol ou pas pour des textes non spatiaux (Brunyé & Taylor, 2008; De Beni, Pazzaglia, Gyselinck, & Meneghetti, 2005; Pazzaglia, De Beni, & Meneghetti, 2007). Il est donc possible que les individus utilisent également la simulation sensorimotrice podokinétique pour construire une représentation spatiale multimodale lors de la lecture de textes en perspective route.

Afin de tester plus directement cette idée, Brunyé, Mahoney et Taylor (2010) ont fait apprendre des textes spatiaux en perspective route et survol à des participants, qui entendaient tout en lisant soit des bruits de pas, soit des bruits de métronome. Les bruits de pas ou de métronome pouvaient avoir soit un rythme lent soit un rythme rapide, sachant que le rythme changeait toujours au milieu de chaque texte (du rapide vers le lent ou du lent vers le rapide, ordre contrebalancé). Les phrases du texte étaient présentées sur l'écran de l'ordinateur, le participant devant appuyer sur la barre « espace » pour les faire apparaître successivement. Chaque participant lisait quatre textes, deux en perspective survol et deux en perspective route, chaque texte associé à une perspective étant accompagné de bruits de pas ou de bruits de métronome. La logique de cette étude est que si la simulation sensorimotrice des informations podokinétiques est utilisée lors de la lecture de textes en perspective route, alors la vitesse des bruits de pas devrait influencer les temps de lecture en perspective route mais pas en perspective survol.

Les résultats montrent que le rythme des bruits de métronome influence la vitesse de lecture de tous les textes, mais que seuls les temps de lecture des textes en perspective route sont affectés par le rythme des bruits de pas : si le rythme est lent (marche), le temps de

lecture est plus long que lorsque le rythme est rapide (course). Ainsi l'interprétation des auteurs est que les textes en perspective route amorcent l'utilisation de la simulation sensorimotrice des informations podokinétiques lors de la compréhension spatiale. Le recalibrage des propriétés de la simulation sensorimotrice par des indices de rythme de marche influence la vitesse de locomotion simulée dans l'environnement. En revanche, ce processus de simulation sensorimotrice ne concerne pas les textes en perspective survol, ce que les auteurs interprètent comme une preuve de l'absence d'une composante sensorimotrice pertinente pour le traitement des formats de représentation allocentrés (voir p. 72). Ces résultats nous indiquent uniquement que la simulation est utilisée lors de l'encodage de la représentation, mais rien ne nous suggère que ces informations podokinétiques dérivées de la simulation soient ensuite intégrées dans la représentation spatiale et modulent sa forme ou sa nature.

Afin de tester l'hypothèse d'une relation directe entre les paramètres de vitesse de la simulation et les proportions encodées en mémoire dans la représentation spatiale, Brunyé et collaborateurs (2010) ont répliqué leur expérience en demandant cette fois-ci aux participants de dessiner les cartes des environnements appris. Sur chaque carte devait figurer les points de repères décrits dans les textes. Les participants devaient également fournir un jugement sur la grandeur de l'environnement sur une échelle en cinq points. La phase d'apprentissage se composait également de textes en perspective route ou survol, associés à des bruits de pas ou de métronome rapides ou lents. Les résultats montrent alors que les participants ont jugé les environnements plus grands si la lecture du texte était accompagnée de bruits de pas rapides (comparé aux bruits de pas lents), et cela uniquement pour les textes en perspective route. De plus, les distances mesurées entre les points de repères lors de la tâche de dessin de carte étaient globalement surestimées dans la condition texte route/bruits de pas rapides, comparé à la condition texte route/bruits de pas lents. Aucun effet significatif des bruits de métronomes n'a été observé sur ces tâches de mémoire. L'effet des bruits de pas rapides et lents n'affectait pas les textes appris en perspective survol. L'ensemble des résultats de cette expérience semble montrer que les propriétés métriques de la représentation spatiale encodée en mémoire peuvent être modulées par un recalibrage de la simulation sensorimotrice

- *Question de recherche: Etude 2 de la thèse*

Les résultats obtenus par Brunyé, Mahoney et Taylor (2010) suggèrent qu'il est possible de recalibrer la vitesse de la locomotion simulée lors de la lecture de textes spatiaux, et

d'observer les effets de ce recalibrage sur les performances de mémoire spatiale. Il s'agit cependant de l'interprétation faite de ces résultats par les auteurs en question, et de futures études sont requises afin de tester la validité de cette hypothèse. Nous pouvons par exemple nous demander si cet effet n'est pas attribuable au cas particulier de l'acquisition de connaissances spatiales par le biais de la lecture, qui implique la mise en œuvre de processus de simulation ou d'imagerie. Or ces processus peuvent être utilisés comme des stratégies facilitant la construction de représentations spatiales pour des lecteurs de textes spatiaux (Gyselinck et al., 2007; Gyselinck, Meneghetti, De Beni, & Pazzaglia, 2009). Il a de plus été montré que l'information visuelle était supérieure à l'information kinesthésique dans la vitesse de traitement et la précision des estimations de distances (Iachini & Giusberti, 2004; Thinus-Blanc & Gaunet, 1997), l'information kinesthésique n'étant préférentiellement utilisée qu'en l'absence d'indices visuels. De plus, l'information kinesthésique est supposée être difficile à encoder et à récupérer en mémoire (Hughes, Epstein, Schneider, & Dudock, 1990), diminuant la probabilité de l'encodage spontané des informations podokinétiques dans la représentation spatiale. Il est donc possible que les arguments expérimentaux fournis par Brunyé et collaborateurs ne soient valables que dans le cas précis de la lecture, lorsque les informations visuelles ne sont pas disponibles et qu'il est donc pertinent d'utiliser d'autres sources d'information (podokinétiques) pour aider à la construction d'une représentation.

Si la lecture est un cas particulier de l'apprentissage spatial, est-il possible d'observer les effets d'un processus de recalibrage implicite de la simulation sensorimotrice dans le cadre de l'apprentissage spatial visuel dans l'environnement ? Pour ce faire, nous nous proposons d'étudier une situation de recalibrage différente de celle utilisée par Brunyé, en ne manipulant pas directement des indices de vitesse de marche mais en manipulant la perception d'effort physique associé à la locomotion. Comme nous allons le décrire dans la prochaine partie, la perception de l'effort physique peut être considérée comme l'un des facteurs influençant la perception des propriétés métriques d'un lieu : toutefois l'effort moteur n'implique pas forcément de modulation du lien entre vitesse du flux optique et vitesse de marche (il ne s'agit que d'un modulateur de la « pénibilité » associée à la locomotion). Ainsi, observer un effet de l'effort physique sur les performances en mémoire spatiale en présence d'informations visuelles constituerait un argument fort en faveur d'une vision multimodale de la représentation spatiale (Tversky, 1993, 2003) intégrant les contraintes liées à l'économie d'énergie (Proffitt, 2006) à travers l'utilisation de la simulation sensorimotrice (Brunyé, Mahoney, & Taylor, 2010).

2.3.4. L'effort physique comme modulateur des propriétés métriques de la représentation spatiale ?

2.3.4.1. *Recalibration de l'effort et perception des distances*

Plusieurs études ont montré que la perception des distances pouvait s'appuyer sur les informations podokinétiques, en l'absence de vision (Afonso et al., 2010; Loomis et al., 1993), ou être influencée par un recalibrage de la synchronie entre informations visuelles et informations proprioceptives (Campos, Butler, & Bühlhoff, 2012; Iachini & Giusberti, 2004; Rieser et al., 1995; Waller & Richardson, 2008). Un champ d'étude important s'est également intéressé à décrire comment le recalibrage du coût énergétique associé à la locomotion pouvait impacter la perception des distances. Ces travaux ont été réalisés dans la lignée de l'approche « action-specific » de Proffitt : si les coûts énergétiques sont intégrés à la perception et que le principe d'économie d'action régit le comportement, alors la perception devrait être déformée par l'effort physique expérimenté. Cette déformation devrait alors avoir pour but de limiter l'engagement de l'organisme dans des comportements sous optimaux ou trop coûteux en termes de ressources énergétiques, souvent au détriment de l'efficacité « nette » (maximum de bénéfices en un minimum de temps). Cette idée a émergé à la suite d'observations éthologiques, qui ont notamment montré des comportements de minimisation du coût énergétique de locomotion chez une population d'abeilles. En effet, il est fréquent d'observer des abeilles abandonner des sources de nourriture non épuisées pour revenir à la ruche avec une charge de nectar inférieure à la capacité de stockage (en poids net) de l'insecte (Schmid-Hempel, Kacelnik, & Houston, 1985). Cette observation contraire aux modèles traditionnels du comportement des espèces animales récolteuses suggère que les abeilles intégreraient le coût métabolique associé au transport de nectar selon la distance, et sélectionneraient des comportements permettant de minimiser ce rapport. Afin de vérifier cette hypothèse, Schmid-Hempel (1986) a proposé une méthodologie originale consistant à recalibrer l'effort de locomotion des abeilles en leur apposant un poids supplémentaire fixé au thorax. Les résultats de cette manipulation montrent que les abeilles lestées portent moins de nectar que les non lestées, et parcourent moins de distance (Schmid-Hempel, 1986) : le coût métabolique supplémentaire modifie les comportements de locomotion.

De la même manière, on a observé chez le sujet humain qu'augmenter l'effort physique associé à la locomotion conduisait à une surestimation des distances immédiates.

Par exemple, recalibrer l'effort de locomotion en faisant porter un sac-à-dos lourd (Proffitt, Stefanucci, Banton, & Epstein, 2003) conduit les participants à surestimer les distances immédiates (mais voir Durgin et al., 2009, pour des résultats contradictoires). Dans une expérience traitant du lien entre capacités d'action et perception des distances, Lessard, Linkenauger et Proffitt (2009) ont demandé à des participants de marcher 60 mètres avec ou sans poids supplémentaire apposé aux chevilles. Pour les participants lestés, il s'agissait donc d'une phase de recalibrage visant à modifier la perception du coût énergétique associé aux informations podokinétiques, et non la vitesse du flux optique comme dans les précédentes études (Iachini & Giusberti, 2004; Rieser et al., 1995). Ensuite, les participants étaient placés sur une plateforme de départ, et devaient estimer s'ils se sentaient capables de sauter jusqu'à une plateforme cible située devant eux et séparée de la plateforme de départ par un espace vide d'amplitude variable (voir *Figure 8*). Après avoir énoncé leur jugement de capacité d'action, les participants devaient estimer la longueur de l'espace séparant les deux plateformes en ajustant la position de deux repères afin qu'elle corresponde à la distance cible (tâche non verbale d'estimation de distance). Les résultats montrent que porter des poids lestés aux chevilles conduit à surestimer les distances, mais seulement lorsque celles-ci étaient considérées comme franchissables. En dehors des capacités d'action (distances jugées comme impossibles à sauter), les auteurs n'observent aucune différence significative entre les estimations des participants lestés et celles des participants non lestés (Lessard et al., 2009).

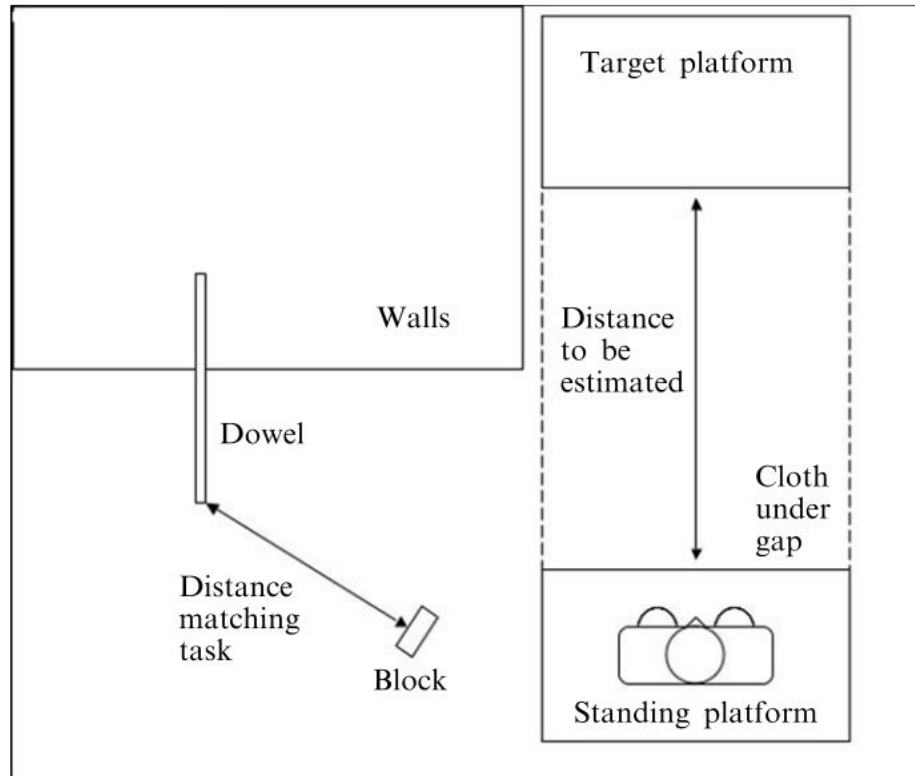


Figure 8 - Schéma de l'expérience de Lessard, Linkenauger et Proffitt (2009), le participant se tenant sur une plateforme doit estimer s'il se sent capable de sauter sur la plateforme cible, puis doit appairer deux repères (bloc et baguette en bois) pour qu'ils représentent la distance séparant les deux plateformes. L'effort physique est manipulé par une phase de calibration avec ou sans poids aux chevilles (tiré de Lessard, Linkenauger & Proffitt, 2009, p. 1864)

Ces résultats soutiennent l'idée que l'espace est perçu par le biais de l'intégration entre potentiels d'action et ressources énergétiques disponibles pour l'action. Ils sont appuyés par d'autres observations, montrant notamment que les distances immédiates sont également surestimées par les individus souffrant de douleurs chroniques associées à la marche (Witt et al., 2009) ou souffrant d'obésité (Sugovic, Turk, & Witt, 2016). De plus, amorcer des stéréotypes liés à l'âge conduit également des sujets sains à surestimer les distances immédiates (Chambon, 2009). À l'inverse, l'augmentation du taux de glucose dans le sang associé à l'ingestion de boissons sucrées est corrélée avec une sous-estimation des distances immédiates (Schnall et al., 2010), de même que la consommation de suppléments de glucides (Zadra, Weltman, & Proffitt, 2016). De plus, les participants ayant ingéré de la boisson énergétique estiment leur niveau d'énergie plus élevé que les participants ayant ingéré un placebo, et sous-estiment significativement les distances immédiates (Cole & Balcetis, 2013).

Toutefois ces éléments « incarnés » internes aux individus ou expérimentalement imposés (poids lestés) ne sont pas seuls responsables du recalibrage de la perception de l'espace : les caractéristiques de l'environnement peuvent également modifier la perception des distances, et donc possiblement l'encodage de celles-ci dans la représentation.

2.3.4.1. Le « *distance-on-hill* » effect

L'exemple le plus frappant de l'influence de l'environnement sur la perception des distances (selon une perspective dirigée vers l'action) concerne les pentes montantes. On a déjà montré précédemment que l'inclinaison perçue des pentes dépendait des ressources énergétiques disponibles (p. ex. p. 84). Mais les pentes en soi sont également responsables de déformations des propriétés métriques perçues en l'absence de manipulation de l'état du percevant : les distances estimées sur des surfaces en pente sont significativement surestimées, comparé à des distances sur surfaces planes (Stefanucci, Proffitt, Banton, & Epstein, 2005). Ce phénomène a été baptisé « *distance-on-hill effect* » et a été interprété comme traduisant l'anticipation de coûts énergétiques plus importants associés à la locomotion en pente montante. Cet effet fut en premier lieu étudié par le biais d'estimations verbales directes (Stefanucci et al., 2005), une méthodologie largement critiquée pour sa perméabilité aux biais de demandes (p. ex. Durgin et al., 2009; Firestone & Scholl, 2015). Plusieurs répliques de cet effet ont ensuite été observées lors de l'exécution de tâches moins perméables à la subjectivité, telle que l'estimation de distances par la marche aveugle (Laitin, Tymoski, Tenhundfeld, & Witt, 2019; Tenhundfeld & Witt, 2017).

En parallèle du *distance-on-hill effect*, d'autres études utilisant des tâches très différentes ont observé des biais de jugements allant dans le sens de l'interprétation sous forme d'économie d'action implicite. Par exemple, Brunyé, Mahoney, Gardony et Taylor (2010) ont mis en évidence un biais de choix d'itinéraires sur cartes. Dans cette étude, les auteurs ont demandé à des participants de choisir l'itinéraire qui leur semblait le plus efficace entre deux itinéraires de longueurs équivalentes sur une carte, chacun reliant les mêmes points de départ et d'arrivée. La seule différence entre les deux itinéraires était l'orientation des segments : la moitié des paires d'itinéraires contenaient une alternative orientée majoritairement vers le nord et une alternative orientée vers le sud, et l'autre moitié des paires d'itinéraires contenaient une alternative orientée vers l'est et une alternative orientée vers l'ouest (voir *Figure 10*). Les résultats ne montrent aucune préférence de choix moyen pour les paires d'itinéraires est-ouest, mais une préférence significative est observée pour les

itinéraires orientés vers le sud comparé aux itinéraires orientés vers le nord. Cette différence est potentialisée lorsque les examinateurs demandent explicitement aux participants de se placer dans une perspective égocentrée pour remplir la tâche, et disparaît lorsque la consigne est de ne se fier qu'à une perspective allocentrée. Les auteurs interprètent ces résultats comme témoignant de l'existence d'une heuristique de planification liée à l'effort physique anticipé : « *north = uphill* » (le nord est associé à la pente montante). Cette heuristique intégrerait l'association entre les directions cardinales et la topographie du terrain, suggérant que le nord est plus fréquemment associé à des régions montagneuses ou escarpées que le sud (Brunyé, Gagnon, et al., 2012).



Figure 9 - Matériel utilisé par Brunyé et collaborateurs (2010), avec exemple de paires de trajets de chaque type (tiré de Brunyé et al., 2010, p. 702)

Toutefois si les résultats obtenus par Brunyé et collaborateurs (Brunyé, Gagnon, et al., 2012; Brunyé, Mahoney, Gardony, et al., 2010) peuvent être interprétés en faveur de l'idée que le coût énergétique est également intégré à la planification d'itinéraires sur cartes, ils ne sont pas pour autant totalement compatibles avec le *distance-on-hill effect*. En effet, la préférence pour les routes orientées vers le sud (ou l'évitement des routes orientées vers le nord) n'est pas systématiquement accompagnée d'une surestimation des distances associée

aux itinéraires orientés vers le nord (Brunyé, Mahoney, Gardony, et al., 2010). En revanche, les itinéraires orientés vers le nord sont jugés comme plus longs à parcourir que ceux orientés vers le sud, à distances égales. Il semble que le *distance-on-hill effect* ne puisse donc pas s'observer dans toutes les tâches et tous les contextes. De plus, d'autres études (Brunyé, Andonova, et al., 2012) ont également montré que l'heuristique « *north = uphill* » pouvait s'observer dans des régions où l'association nord/relief escarpé n'était pas localement respectée (par exemple, aux Pays-Bas ou en Bulgarie, où les chaînes de montagnes sont concentrées au sud du pays). Ceci ne nous permet pas d'exclure de potentielles explications se rapportant à un biais lié au codage cartographique (le nord est toujours représenté vers le haut dans une carte).

En dépit d'observations contradictoires, le *distance-on-hill effect* est une illustration du point de vue de Proffitt (2006). Ce point de vue a été opérationnalisé sous la forme d'un modèle de la dépense énergétique multimodale anticipée par White, Shockley et Riley (2013) : la dépense énergétique étant ici le ratio entre l'énergie exprimée en quantité d'oxygène consommé (McArdle, Katch, & Katch, 2008), et la distance calculée à partir de l'information visuelle. Plus précisément, la dépense d'oxygène est supposée dépendre de deux facteurs : le rythme de marche et la résistance à la marche (White, 2012). Ainsi, diviser la dépense d'oxygène résultant de ces deux facteurs par la distance à parcourir devrait fournir une valeur capable de prédire le coût énergétique anticipé pour chaque acte de locomotion : ce calcul serait effectué implicitement lors de la perception et l'inclinaison du terrain et serait notamment responsable de l'augmentation anticipée de la résistance à la marche (augmentant donc la valeur de la dépense énergétique multimodale pour une distance donnée). L'intérêt d'un tel modèle est qu'il est applicable à d'autres situations que le *distance-on-hill effect* ; il explique par exemple pourquoi les individus surestiment les distances sous l'eau lorsqu'ils ne sont pas équipés de palmes, comparé à une situation dans laquelle ils peuvent nager en dépensant moins d'oxygène avec des palmes (Witt, Schuck, & Taylor, 2011).

- *Question de recherche: Etude 3 de la thèse*

Bien que ces résultats concernent principalement des tâches perceptives, il nous est permis de faire l'hypothèse que la relation entre l'effort physique et l'estimation des distances ait des conséquences sur le plan de la mémoire spatiale. Par exemple, on a montré que les jugements d'inclinaison de pentes étaient toujours davantage surestimés lors d'une tâche de mémoire que lors d'une estimation perceptive directe (Creem & Proffitt, 1998). Dans la même lignée, des

résultats princeps ont suggéré que le rappel mnésique de distances en pente parcourues en marchant était surestimé par rapport aux distances physiques mesurées, mais également aux distances rappelées sur terrain plat (Okabe, Aoki, & Hamamoto, 1986; Peebles, 1964). Globalement, si la perception semble être influencée par des mécanismes d'optimisation de la consommation d'énergie, la mémoire semble également affectée par ce type de processus. Il serait également pertinent de postuler l'existence de tels effets sur la mémoire si l'on se réfère à une vision dirigée vers l'action des processus mnésiques (Glenberg, 1997).

Toutefois les travaux ayant conclu à l'existence du *distance-on-hill effect* ont tous un point commun : ils utilisent une tâche d'estimation de distances durant laquelle le participant est immobile devant la pente, en somme une tâche dans laquelle l'individu est passif. Or, d'autres protocoles mettant en évidence des effets d'évitement de coûts énergétiques ne parviennent pas à répliquer l'effet de surestimation des distances avec d'autres tâches telles que l'estimation de distances depuis une carte (p. ex. Brunyé, Mahoney, Gardony, et al., 2010). De plus, nous avons vu précédemment que la dépense d'énergie associée à la marche était également responsable d'une augmentation des performances dans la mémorisation des propriétés métriques du lieu, comparé aux situations d'apprentissages passives (p. ex. p. 86). Nous nous demandons alors si le *distance-on-hill effect* pourrait être observé lors d'une situation d'apprentissage active, dans laquelle le ratio entre distance parcourue et énergie dépensée (White et al., 2013) est directement expérimenté par le sujet.

Enfin selon un point de vue empruntée du codage prédictif (Friston, 2005, 2012; Rao & Ballard, 1999), la perception de la pente devrait être associée à une hypothèse concernant l'effort de locomotion, conduisant à la formulation implicite d'attentes sur la distance à parcourir en fonction de l'énergie à dépenser. Il est possible que cette prédiction du ratio distance/énergie soit erronée lorsque le sujet est un observateur passif, mais l'activité motrice devrait conduire à une correction des attentes en fonction de l'expérience en temps réel (consommation d'énergie et vitesse du flux optique). Selon cette perspective, l'effet de *distance-on-hill* devrait disparaître lorsque le participant parcourt activement les distances à mémoriser. Afin de tester cette hypothèse, nous proposons d'introduire une transgression des attentes formulées selon les théories du codage prédictif en faisant apprendre à des participants des environnements par le biais d'itinéraires montants ou descendants, tout en maintenant constant l'effort physique déployé pour la locomotion grâce à la réalité virtuelle (même effort déployé pour monter ou pour descendre une pente). Les résultats de cette étude

devraient alors nous permettre de montrer comment les informations visuelles suggérant un effort physique anticipé sont intégrées dans les propriétés métriques de la représentation spatiale.

2.3.5. Influence des effets de capacités d'action sur le matériel spatial

2.3.5.1. Capacités d'actions dans l'espace péri-personnel

Nous avons précédemment discuté le fait que l'apprentissage spatial à grande échelle impliquait le déplacement, ce qui nous a permis de décrire comment la représentation spatiale pouvait intégrer des informations podokinétiques en lien avec la marche. Nous avons également vu que le coût énergétique associé à la locomotion était intégré dans les processus de perception de distances ou d'angles, mais aussi possiblement dans le jugement voire dans la mémoire. Toutefois la locomotion n'est pas la seule action participant à la connaissance spatiale : afin de rassembler des éléments empiriques permettant de suggérer l'existence de représentations spatiales situées et incarnées en mémoire, nous devons également traiter d'autres types d'interactions entre l'organisme et l'environnement. Ainsi si le traitement d'espaces environnementaux semble sensible aux coûts métaboliques de locomotion, le traitement d'espaces *vista* ou péri-personnels semble modulé par d'autres facteurs tels que la morphologie de l'observateur (p. ex. p. 60, ou Proffitt & Linkenauger, 2013) ou la capacité d'action perçue. Nous avons déjà mentionné des exemples de l'influence des capacités d'action podokinétiques sur le traitement de l'information spatiale (p. ex. Lessard et al., 2009), dans cette partie nous nous concentrerons sur la manipulabilité, la capacité à saisir et utiliser manuellement un objet.

Nombre d'arguments issus de la littérature nous permettent de considérer que la manipulation d'objets ou le jugement de manipulabilité influence la perception des distances. Classiquement, il a été observé que les distances péri-personnelles sont sous-estimées lorsque le participant est équipé d'un outil permettant d'allonger sa distance maximale de saisie (Berti & Frassinetti, 1996; Bourgeois, Farnè, & Coello, 2014; Maravita, Husain, Clarke, & Driver, 2001), et ce particulièrement si son intention est spécifiquement de saisir l'objet (Witt, Proffitt, & Epstein, 2005). Cet effet est modulé par la difficulté à saisir l'objet (disponibilité de l'affordance) et la latéralité manuelle du percevant (Linkenauger, Witt, Stefanucci, Bakdash, & Proffitt, 2009). Il est également soutenu par des observations neurologiques

(Farnè, Demattè, Làdavas, & Dematte, 2005) et est interprété comme témoignant de l'existence de processus de simulation motrice dans la perception d'objets proches (Witt & Proffitt, 2008). Ce champ de recherche appuie l'idée de l'existence d'une limite d'action dépendant des caractéristiques morphologiques et modulant la perception de l'espace proche (Fajen, 2005). Cet effet a également été répliqué en manipulant la difficulté à atteindre un objet par le biais d'obstacles : la distance perçue entre l'objet et le percevant dépend de la largeur de l'obstacle, suggérant l'intégration de comportements (plus ou moins contraignants) d'évitement de l'objet dans la perception des distances (Morgado, Gentaz, Guinet, Osiurak, & Palluel-Germain, 2013).

L'effet de la capacité d'interaction existe également dans des tâches plus implicites que l'estimation de distances. Par exemple, lors d'une tâche de bissection de ligne durant laquelle le participant doit placer un repère au milieu exact de la longueur d'un segment, il est classiquement observé un biais de bissection vers la gauche pour les participants droitiers, en raison de la dominance de l'hémisphère droit dans le traitement de l'information spatialisée (Bowers & Heilman, 1980). Or ce biais est annulé voire inversé lorsque la tâche s'effectue hors de l'espace péri-personnel, suggérant des mécanismes de traitement des capacités d'action différents selon les espaces péri et extra-personnels (Varnava, McCarthy, & Beaumont, 2002). De plus, l'amplitude du biais de bissection est proportionnelle à la longueur du bras du participant (Longo & Lourenco, 2007), et réapparaît dans l'espace extra-personnel lorsque les participants sont équipés d'un outil permettant d'allonger leur distance d'interaction (Lourenco & Longo, 2009).

Enfin, Costantini et collaborateurs (2011) ont fourni une réplique de l'expérience de Tucker et Ellis (2004), en ajoutant au protocole original une composante spatiale grâce à l'utilisation de la réalité virtuelle. Dans cette expérience, les participants étaient confrontés à un environnement virtuel dans lequel ils étaient assis devant une table. Sur cette table apparaissaient des objets manipulables, pouvant se situer soit à une distance péri-personnelle (atteignables avec la main), soit au-delà de la limite de capacités d'action (distance extra-personnelle). Après l'apparition de chaque objet on présentait au sujet au centre de l'écran soit un verbe de fonction (p. ex. « manger »), soit un verbe d'action (p. ex. « saisir »), soit un verbe d'observation (p. ex. « regarder »). Le participant avait alors pour tâche de juger le plus rapidement possible si le verbe était compatible avec l'objet qu'il venait de voir. Les résultats de cette étude montrent que les participants étaient plus lents à répondre aux verbes

d'observation qu'aux verbes de fonction ou de manipulation, suggérant que les objets manipulables ont bien amorcé des simulations sensorimotrices de l'acte fonctionnel ou de l'acte de manipulation (p. ex. Bub, Masson, & Cree, 2008). Plus particulièrement, les verbes de fonction et de manipulation étaient plus rapides à traiter lorsque l'objet était situé dans l'espace péri-personnel que dans l'espace extra-personnel : le contexte spatial semble amorcer différemment les affordances (Costantini, Ambrosini, Scorolli, & Borghi, 2011).

2.3.5.2. Performances et biais métriques en mémoire

La distance entre le sujet et l'objet n'est pas la seule qualité métrique de l'espace influencée par les capacités d'actions : la taille perçue des objets peut elle-même varier en fonction de la taille de la main des individus (Haggard & Jundi, 2009; Linkenauger, Ramenzoni, & Proffitt, 2010), de la taille du corps du participant (p. ex. « full body illusion », van der Hoort et al., 2011), mais aussi et surtout en fonction des performances comportementales. Par exemple, la taille d'une balle de softball perçue par des joueurs professionnels est corrélée avec leur performance au cours d'un match : plus le pourcentage de frappes réussites est important, plus la taille de balle semble petite (Witt & Proffitt, 2005). Cet effet a également été reproduit pour le diamètre du trou d'un parcours de golf (Linkenauger, Bakdash, & Proffitt, 2008), d'une cible sur laquelle une balle doit être lancée (Cañal-Bruland & van der Kamp, 2009), ou sur la hauteur d'un filet et la vitesse d'une balle de tennis (Witt & Sugovic, 2010). Toutes ces observations découlent de tâches de mémoire : l'objet à estimer n'est plus physiquement présent devant le participant au moment de l'estimation de sa taille ou de sa vitesse. Ces résultats vont dans le sens d'une relation causale entre le niveau d'efficacité motrice et la perception des propriétés métriques d'objets sur lesquels l'action est effectuée (Laitin et al., 2019).

Cependant ces résultats sont à relativiser : dans une expérience classique, Wesp, Cicello, Gracia et Davis (2004) ont montré que l'estimation de la taille d'une cible de fléchettes dépendait du nombre de flèches atteignant la cible lors d'une partie précédemment jouée. Mais cet effet a par la suite été réinterprété expérimentalement par un biais motivationnel plutôt qu'une distorsion perceptive : les participants ayant mal réussi la tâche ont en réalité adopté implicitement une stratégie de minimisation/justification de l'échec en jugeant la cible comme plus petite (Wesp & Gasper, 2012). Cette observation conduit alors à douter de l'interprétation classique de la nature causale des performances sur la perception des tailles, en raison de l'existence de biais de jugement difficilement contrôlables (Firestone &

Scholl, 2016). Parallèlement, d'autres effets ont été répliqués dans le but de départager les effets perceptifs des biais de jugement : par exemple l'effet « pong », défini comme la surestimation de la vitesse de la balle dans un jeu adapté du classique informatique « pong », lorsque la taille de la raquette utilisée pour bloquer la balle est plus petite que la taille normale (pour une revue sur la question, p. ex. Witt, 2017). Cet effet a été évalué par un grand nombre d'études visant à corriger les éventuels biais méthodologiques pouvant générer des effets perceptifs ou motivationnels, aboutissant à un consensus sur la nature de l'observation : l'effet « pong » semble majoritairement attribuable à une distorsion de la perception causée par la difficulté de la performance (Kirsch & Kunde, 2018). Il semble que les variations de performances peuvent causer des déformations perceptives liées à la taille des objets, cependant les conditions d'apparition de ce type d'effet semblent encore mal connues.

2.3.5.5. *Accessibilité, gestes et mémoire*

Nous avons précédemment discuté l'influence sur la perception des capacités d'actions offertes par l'environnement (et en particulier les objets qu'il contient). Dans une perspective située et incarnée des représentations spatiales, il serait à présent intéressant de savoir si la mémoire encode les possibilités d'actions (Glenberg, 1997), et si celles-ci interviennent dans la représentation spatiale multimodale (Tversky, 1993, 2003). L'hypothèse générale d'une telle perspective serait que les représentations spatiales encoderaient les distances en fonction des possibilités d'interaction (Dutriaux & Gyselinck, 2016a; Zwaan & Radvansky, 1998).

Il existe tout d'abord plusieurs démonstrations de l'effet de la proximité sur l'accessibilité des objets spatialisés en mémoire : Glenberg, Meyer et Lindem (1987) ont notamment montré que la proximité spatiale d'un objet avec une cible facilitait l'accessibilité du rappel en mémoire. Dans cette expérience les participants lisaient un texte dans lequel figurait une phrase présentant le contexte (p. ex. « John était en train d'arranger un bouquet pour la table »), puis après un certain nombre de phrases une proposition décrivant un objet cible pouvant être spatialement associé au sujet (p. ex. « il accrocha la dernière *fleur* à sa boutonnière puis partit faire les courses ») ou spatialement dissociée (p. ex. « il mit la dernière *fleur* dans le vase puis partit faire les courses »). Les auteurs mesurent ensuite l'accessibilité du mot cible en mémoire (ici, « *fleur* ») par une tâche de décision lexicale (expérience 1 = décider si le mot était dans le texte ; expérience 2 = décider si le mot existe). Les résultats montrent que les temps de réponse sont plus courts pour les textes dans lesquels les mots cibles étaient spatialement associés au sujet, que lorsque les mots cibles étaient éloignés du

sujet. Il semble donc que la proximité spatiale facilite l'accessibilité des mots cibles en mémoire (Glenberg et al., 1987).

Des résultats similaires ont été obtenus par Morrow, Greenspan et Bower (1987), qui ont fait apprendre une carte à des participants, sur laquelle figurait différentes pièces d'un building. Chaque pièce contenait quatre objets différents. Après avoir appris la structure spatiale du lieu, les participants lisaient des phrases telles que « *Wilbur sortit de la réserve et rentra dans la laverie* ». Les auteurs présentaient ensuite une paire de noms d'objets et les participants devaient décider le plus vite possible si les deux objets se situaient dans la même pièce. Les résultats montrent que les objets situés dans la pièce où se trouve le protagoniste du texte sont plus accessibles en mémoire que ceux situés dans une autre pièce. Si la phrase texte présente une pièce d'origine, une pièce de transition et une pièce d'arrivée au déplacement du protagoniste, les objets situés dans les pièces de transition et d'arrivée sont plus rapidement traités que ceux situés dans la pièce d'origine. Ces résultats suggèrent que l'accessibilité de l'information dépend de la structure spatiale des objets autour du protagoniste ; si l'objet n'est pas dans un espace proximal, il n'est pas amorcé en mémoire (Morrow et al., 1987).

Les associations observées entre objets et observateurs en mémoire ne semblent pas attribuables à un format de représentation purement visuel ou allocentré, mais plutôt à un format de représentation sensorimoteur dirigé vers l'action : de nombreuses études ont suggéré une relation étroite entre représentation de l'espace et actions de la main notamment. Par exemple, les effets de compatibilité d'action similaires à ceux observés par Glenberg et Kaschak (2002) pour le traitement des concepts ont été observés dans le traitement de l'information spatiale : Wang, Taylor et Brunyé (2012) ont présenté des descriptions spatiales à des étudiants du campus universitaire de l'Université Tufts, contenant un bâtiment de référence, un bâtiment cible et une direction (droite ou gauche). Chaque bâtiment faisait partie du campus, connu ou inconnu des participants, et chaque paire de bâtiments pouvait être soit spatialement proche, soit spatialement éloignée. Dans un second temps, les participants étaient soumis à des phrases test (p. ex. « vous êtes devant l'entrée de *Dowling Hall*, *Eaton Hall* est à votre droite »), leur tâche était alors de répondre si la phrase était spatialement correcte en déplaçant la souris du centre de l'écran vers des boutons « oui » ou « non » situés en haut à gauche ou en haut à droite. Les auteurs ont recueilli la trajectoire de la souris pendant la réponse des participants : lorsque la localisation réelle du bâtiment était congruente avec le côté de la réponse (p. ex. bâtiment réellement à droite et réponse « oui » à droite), les

temps de réponse étaient plus rapides que dans les situations incongruentes (p. ex. bâtiment à droite mais réponse « oui » à gauche). Le résultat le plus frappant de cette étude concerne l'effet de compatibilité d'action : pour les participants disposant d'une bonne connaissance spatiale du campus, la trajectoire de la souris était déviée en direction de la position réelle du bâtiment (si la position du bâtiment est incongruente avec le côté de la réponse, le mouvement de la main était dévié du côté opposé au côté de la réponse avant de revenir vers le bouton de réponse). En revanche, pour les participants ne connaissant pas l'organisation spatiale du campus, la trajectoire de la souris était déviée en direction du terme lexical utilisé dans la phrase cible. En résumé, les participants ayant intégré correctement les relations spatiales entre bâtiments ont associé leur rappel mnésique à une action motrice de la main, contrairement à ceux qui ne disposaient pas d'une bonne connaissance spatiale (dont le terme lexical latéralisé a simplement amorcé une action latéralisée). Les auteurs concluent que les associations perceptivo-motrices entre localisation spatiale et gestes peuvent jouer un rôle dans la récupération de la représentation spatiale (Wang et al., 2012).

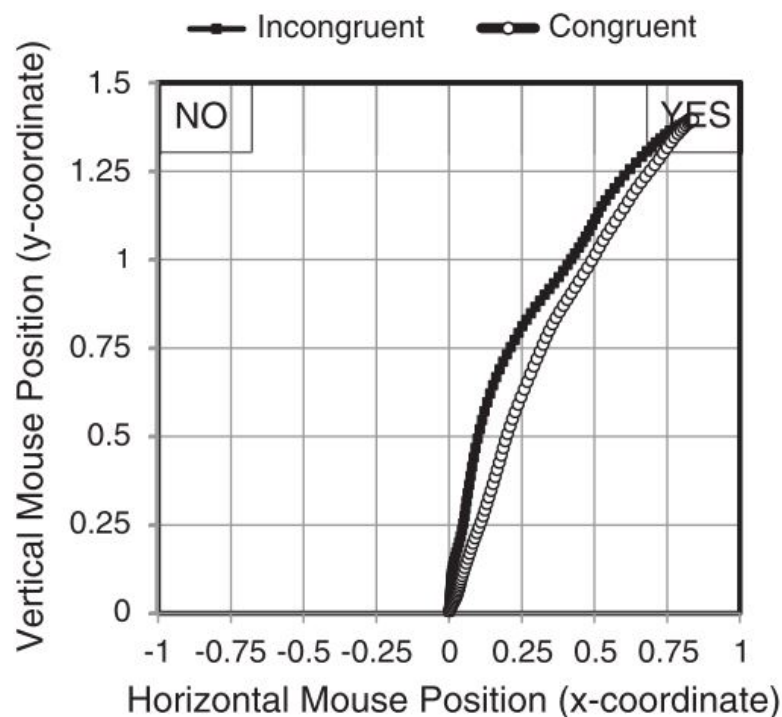


Figure 10 - Illustration de l'effet de compatibilité d'action entre position du point de repère et trajectoire de la souris lors de la réponse (Wang, Taylor & Brunyé, 2012). La trajectoire de la souris pour les essais incongruents est décalée vers le côté opposé de la réponse. Les essais bilatéraux ont été moyennés d'un seul côté ici (tiré de Wang, Taylor & Brunyé, 2012, p. 452)

Des effets de compatibilité entre action latéralisée de réponse et la direction spatiale en mémoire ont également été observés dans le cadre de la compréhension de phrases décrivant des actions (Zwaan & Taylor, 2006), ou de la prise de perspective (Emmorey, Tversky, & Taylor, 2001). Des études traitant de la gestuelle spontanée de participants durant l'apprentissage ou le rappel spatial montrent également que les gestes de la main reflètent l'organisation de la représentation (Hostetter & Alibali, 2008) et facilitent les performances de rappel (Jamalian, Giardino, & Tversky, 2013). Ces résultats suggèrent que la connaissance spatiale est répartie spatialement en lien avec l'action, aidant à structurer la pensée (Goldin-Meadow & Beilock, 2010; Kang & Tversky, 2016).

- *Question de recherche: Etude 4 de la thèse*

Nous parvenons à un paradoxe au terme de cette partie : l'intégration de l'information sensorimotrice semble à la fois responsable de biais dans l'estimation perceptive de distances, et incluse dans le processus rappel mnésique. Ceci pose la question de la conservation des biais causés par les jugements de capacité d'action sur la perception des distances en mémoire. Or, nous ne disposons que d'arguments expérimentaux indirects permettant de comprendre si les capacités d'action modulent la représentation mnésique (p. ex. Dutriaux & Gyselinck, 2016).

Si les capacités d'interaction sont responsables de biais dans la perception des distances (p. ex. Witt et al., 2005), alors les conséquences de ces biais sur la représentation spatiale doivent être étudiés afin de conclure à la multimodalité de celle-ci. Nous proposons de mettre en lumière l'effet de l'interaction physique avec des objets dans les propriétés métriques de la représentation spatiale créée à partir de l'apprentissage d'un lieu : la simulation sensorimotrice liée aux actions comprises dans l'espace péri-personnel influence-t-elle les propriétés de la représentation spatiale de l'espace extra-personnel ?

Afin d'explorer cette question et de résoudre le paradoxe de l'influence des capacités d'action sur le traitement de l'information spatiale, nous utiliserons un protocole d'apprentissage inspiré de la méthode des lieux (Yates, 1966), adaptée en réalité virtuelle immersive. Peu d'études se sont intéressées à l'apprentissage par la méthode des lieux en réalité virtuelle (voir Legge, Madan, Ng, & Caplan, 2012), il sera donc intéressant dans un premier temps de pouvoir isoler la contribution de l'imagerie visuelle ou motrice dans la facilitation des performances. De plus, nous pourrons de la sorte observer des éventuels biais liés à l'estimation des distances en fonction de la capacité d'action, nous permettant de mieux

comprendre comment les jugements de manipulabilité induisent un biais en mémoire. De ce fait, nous observerons l'effet de la manipulabilité des objets à mémoriser sur ces biais en mémoire, puisque les concepts manipulables amorcent des représentations sensorimotrices (Tucker & Ellis, 1998). Ces travaux devraient alors permettre de fournir une vision plus globale des différentes contributions spécifiques des informations sensorimotrices aux propriétés de la représentation spatiale.

2.3.6. En résumé : contribution des informations sensorimotrices,
paradoxes et variabilité(s)

Cette troisième et dernière partie de la revue de littérature était consacrée à la description des contributions sensorimotrices au traitement de l'espace, aussi bien dans la perception que dans la mémoire. Dans un premier temps, nous avons décrit deux modèles théoriques permettant de comprendre comment l'espace est catégorisé en rapport au corps : le modèle des corrélats neuro-anatomiques (Coello & Delevoeye-Turrell, 2007) et l'approche « *action-specific* » (Proffitt, 2006). Le premier modèle permet de comprendre comment les affordances offertes par l'environnement sont intégrées de façon dynamique dans la perception et l'expérience empirique de l'espace. Le second modèle enrichit cette vision dynamique de l'interaction entre l'espace et le corps par le principe d'économie d'action, qui stipule que la consommation d'énergie nécessaire au comportement est intégrée dans le processus de perception afin d'optimiser la dépense métabolique. Ainsi nous avons pu décrire quelques arguments expérimentaux montrant que la perception des propriétés métriques de l'espace (p. ex. l'orientation des pentes) variait en fonction des contraintes sensorimotrices du percevant (fatigue, effort physique, etc.).

Nous nous sommes ensuite attaché à décrire le champ théorique de l'apprentissage spatial actif, en prenant soin d'insister sur la contribution spécifique des informations sensorimotrices participant à la marche (information idiothétiques, puis podokinétiques) dans la création de la représentation spatiale. Globalement, l'ensemble des travaux cités semblent suggérer que la locomotion par la marche améliore les performances d'apprentissage spatial, seulement lors de situations d'apprentissages cohérentes avec l'acte de locomotion : lorsque l'environnement est suffisamment grand (contenu dans un espace environnemental) et suffisamment complexe. Il semblerait également que la disponibilité des informations podokinétiques lors de la marche facilite l'estimation de distances et l'actualisation de la

position de l'individu dans l'espace. Toutefois nous avons également pu constater que la contribution fonctionnelle de ce type d'information sensorimotrice à la représentation spatiale est encore mal comprise, et interagit probablement avec d'autres effets cognitifs (effet d'*enactment*, effet de spécificité de l'encodage...). Plus important encore, il existe une ambiguïté entre le rôle de l'information podokinétique en mémoire et la potentialisation des performances cognitives produite par la simple activité physiologique (état d'éveil métabolique connu comme facilitant l'exécution de tâches de mémoire notamment).

La troisième division de ce chapitre était consacrée à l'imagerie mentale motrice et la simulation sensorimotrice de la marche. Nous avons passé en revue les quelques arguments nous permettant de penser que le traitement de l'information spatiale pouvait recruter le cortex sensorimoteur participant à la simulation sensorimotrice de la locomotion. Ces données ont été pour l'essentiel recueillies grâce à des protocoles de recalibrage, visant à observer comment des transgressions de la relation entre flux optique et informations podokinétiques pouvaient impacter la perception des distances. Des protocoles de marche aveugle montrent que l'information podokinétique peut suffire à estimer assez précisément les distances. Nous avons également décrit l'une des seules expériences traitant explicitement de simulation sensorimotrice lors de l'apprentissage de lieu (Brunyé, Mahoney, & Taylor, 2010), qui nous permet de penser que la marche est simulée lors de la lecture de textes spatiaux en perspective route, et que le rythme des paramètres biomécaniques de la marche simulée (affectant la vitesse de la locomotion) peut affecter les propriétés métriques de la représentation spatiale.

Après avoir montré que les informations podokinétiques pouvaient faciliter l'apprentissage spatial à grande échelle, et qu'elles étaient possiblement implicitement simulées lors de la compréhension de textes spatiaux égocentrés, nous nous sommes intéressé à la manière dont l'effort moteur pouvait moduler cet effet : selon la perspective de Proffitt (2006), faire varier la quantité d'énergie dépensée ou à dépenser durant la locomotion devrait faire apparaître des signes d'économie comportementale. Cette économie comportementale se caractérise notamment par des biais d'estimation de distances lorsque la dépense énergétique anticipée est plus importante que la moyenne. Ce phénomène a été illustré par le *distance-on-hill effect*, traduit par le fait que les distances en pente sont surestimées par rapport aux distances sur terrain plat en raison d'un calcul implicite du rapport entre distance à accomplir et énergie à dépenser (possiblement par le biais de la simulation sensorimotrice des informations podokinétiques). Cet effet lié à l'économie d'action bénéficie de très rares

démonstrations sur la mémoire, ou sur la connaissance conceptuelle des reliefs adaptés au traitement de cartes (Brunyé, Mahoney, Gardony, et al., 2010). Cependant, l'absence d'explications satisfaisantes motive des recherches supplémentaires, nécessaires pour une meilleure compréhension de ce phénomène sur la mémoire spatiale.

Enfin, nous avons adopté un changement de perspective et d'échelle afin d'examiner comment les informations sensorimotrices pouvaient contribuer au traitement de l'espace péri-personnel, lors de l'exécution (ou l'exécution planifiée) de gestes de saisie manuelle. Nous avons ainsi pu montrer que les distances entre l'observateur et un objet situé dans l'espace péri-personnel étaient traitées différemment des distances dépassant cet espace péri-personnel. En règle générale, le traitement de distances proches du corps est présenté comme systématiquement sous-estimé en raison de la capacité d'interaction possible avec les objets contenus dans l'espace péri-personnel. Ces observations largement répliquées ont permis de formuler l'hypothèse selon laquelle la capacité d'action (modulée par des caractéristiques physiologiques ou environnementales) ou la performance motrice modulent les propriétés métriques des espaces autour du corps. Encore une fois, de nombreux arguments empiriques en faveur de cette hypothèse concernent des tâches de perception, et très peu d'éléments issus de la littérature nous permettent d'affirmer que ce phénomène intervient dans la représentation spatiale : rien ne nous permet de penser que ce qui est perçu est conservé à l'identique en mémoire.

L'ensemble de cette partie nous a permis de constater qu'en dépit de résultats intéressants aucun consensus clair n'existe quant à la contribution spécifique des informations sensorimotrices sur le traitement de l'information spatiale. Plusieurs paradoxes ont été identifiés concernant des effets apparaissant dans certaines situations mais pas dans d'autres, ou encore des contributions aux performances tantôt facilitatrices, tantôt responsables de l'inclusion de biais perceptifs. Au-delà de cette variabilité d'effets associés à une grande variété de protocoles et de tâches peu comparables les unes aux autres, il est important de signaler que les explications situées et incarnées de certaines contributions sensorimotrices au traitement spatial sont réfutées par certains auteurs. En effet, plusieurs travaux ont conclu à l'attribution des effets décrits au cours de ce chapitre à des biais de demande, ou à un processus de jugement complètement indépendant de la perception ou de la mémoire (p. ex. Durgin et al., 2009; Firestone & Scholl, 2014, 2016).

PARTIE EXPERIMENTALE

3. ETUDE 1 : EFFET FACILITATEUR DE LA LOCOMOTION SUR L'ENCODAGE DE REPRESENTATIONS SPATIALES

3.1. OBJECTIFS

La disponibilité des informations podokinétiques lors de l'apprentissage d'un lieu est classiquement associée à une facilitation des performances spatiales. Toutefois, les mécanismes cognitifs et physiologiques participant à cet effet n'ont pas encore été clairement départagés : les informations podokinétiques sont encodées dans la représentation et contribuent à améliorer sa qualité, ou l'activité de marche déclenche un état d'éveil physiologique améliorant globalement les performances cognitives ?

La première étude de cette thèse a pour but de rassembler des premiers éléments comportementaux permettant de répondre à cette question. La logique est la suivante : si les informations podokinétiques participent à la construction de la représentation spatiale et enrichissent les propriétés, alors elles doivent être disponibles via la marche durant l'encodage de la représentation (c'est-à-dire durant l'apprentissage d'un lieu nouveau). Cette situation correspond à l'ensemble des travaux s'intéressant à l'apprentissage spatial actif jusqu'à maintenant (p. ex. p. 86). Ces travaux n'ont cependant pas étudié l'effet de la marche durant l'exécution des tâches spatiales, ni lors de la phase de récupération de la représentation. Afin de conclure que les informations podokinétiques participent à l'apprentissage et pas à un autre mécanisme (amorçage de stratégies de récupération liée à l'imagerie motrice, par exemple), il semble nécessaire d'observer l'effet facilitateur de la marche disparaître lors de la récupération.

A l'inverse, si la facilitation des performances apportée par la marche est liée à un effet d'éveil physiologique stimulant les performances cognitives de manière généralisée, alors le moment de la marche ne devrait plus avoir d'importance : la même activité physique implique le même niveau d'activation métabolique à l'encodage ou à la récupération. Donc, si la marche lors de la récupération amène les mêmes bénéfices que la marche lors de l'encodage dans cette étude, cela signifierait que les effets facilitateurs de l'apprentissage spatial actif ne sont pas dus à la contribution fonctionnelle des informations podokinétiques lors de la construction d'une représentation spatiale multimodale.

Afin de tester ces deux alternatives, la première étude de cette thèse s'intéresse à l'apprentissage spatial à large échelle de lieux complexes, supposés bénéficier de l'information podokinétique translationnelle (Mellet et al., 2010; Ruddle, Volkova, & Bühlhoff, 2011). Quatre groupes indépendants ont été constitués en fonction du moment de la marche : durant l'encodage de la représentation spatiale, durant sa récupération, pendant les deux moments ou pas du tout. Une telle méthodologie devrait nous permettre de comparer les effets de la marche durant l'apprentissage actif (phase d'encodage) par rapport à d'éventuels effets de spécificité à l'encodage (Thomson & Tulving, 1973) concernant le groupe marchant à la fois durant l'encodage et durant la récupération.

De plus, nous avons défendu l'idée que les différents formats de la représentation spatiale ne sont pas utilisés dans les mêmes tâches (p. ex. partie « Différents espaces, différents formats de représentation ? », p. 72), nous testerons donc les performances spatiales lors de tâches de rappel selon une perspective égocentrée et allocentrée. Plusieurs travaux ayant déjà montré des différences inter-individuelles dans les préférences et habitudes d'utilisation de chacune de ces perspectives (Pazzaglia & Meneghetti, 2017), nous prendrons en considération ce paramètre dans notre analyse de résultats.

Enfin, afin de mieux comprendre comment l'information podokinétique influence les propriétés de la représentation spatiale nous adopterons une méthode d'analyse de performances spatiales récente (Gardony, Taylor, & Brunyé, 2016), permettant de comparer les qualités géométriques de positions spatiales rapportées par des participants sur carte, aux positions réelles sur une carte de référence. Cette méthode d'analyse de cartes et de positions devrait nous permettre de tester l'idée selon laquelle les informations podokinétiques ne facilitent pas globalement les performances mais ont un rôle fonctionnel précis dans la construction de la représentation spatiale : l'ajustement des propriétés métriques (angles et distances) en mémoire.

3.2. ARTICLE 1

“Walk this way”: specific contributions of active walking on metric properties encoding during spatial learning

Simon Lhuillier^a, Valérie Gyselinck^b, Pascale Piolino^a, & Serge Nicolas^a.

^a *Laboratoire Mémoire, Cerveau et Cognition, Université de Paris, Paris, France*

^b *IFSTTAR, Laboratoire de Psychologie des Comportements et des Mobilités, Versailles, France*

ABSTRACT

Body-based information effect on spatial memory has been traditionally described as a facilitating factor for large-scale spatial learning in the field of active learning research (Chrastil & Warren, 2012). The specific contribution of body-based information to the spatial representation properties is however not well defined yet and through which mechanisms body-based information are contributing to spatial learning are not clear enough. In order to disambiguate the effect of active spatial learning on the quality of spatial representations from the beneficial effect of physiological arousal, we compared four experimental conditions (walk on a unidimensional treadmill during learning, retrieval, both phases or not). Results showed no effect of the walking condition for a route perspective task, but a significant effect on a survey perspective task (landmark positioning on a map): participants who walked during encoding (encoding group and encoding + retrieval group) obtained better results than those who did not walked or only walked during retrieval. Geometrical analysis of spatial positions on maps revealed that the activity of walking during encoding improves the correlation between participants' coordinates and actual coordinates through better distance estimations and angular accuracy. Control group variance in all measures was higher than walking groups (regardless of the walking moment). Taken together, these results provide arguments for a multimodal nature of spatial representations, where body-related information derived from walking are involved in metric properties accuracy and perspective switching.

KEYWORDS: *spatial learning, active walking, metric properties*

3.2.1. Introduction

3.2.1.1. *Active spatial learning*

Research in the field of spatial learning is motivated by the need to understand how individuals integrate information about places and positions into some sort of spatial knowledge. Understanding spatial processing requires considering its deep entanglement with action and movement. The body can be viewed as the system of axes and co-ordinates to locate exterior objects (Poincaré, 1914), thus transforming space into a “place for action” (Gärling & Golledge, 1989), and spatial mental representations into mental devices subtending behavior (Tversky, 1993). In line with the growing popularity of situated and embodied views on cognition putting the emphasis on the interactions between the mind, the body and the world (Barsalou, 2008; Gibbs, 2006), research in the field of spatial learning developed with the idea that space perception is not isotropic but shaped by the body (Franklin & Tversky, 1990; Tversky, 2003) and its potential for action (Gibson, 1979; Proffitt, 2006). Thus, numerous authors have hypothesized that physically moving for exploring novel environments could contribute to form the subsequent spatial representation, introducing an expanding field of research focused around the concept of active spatial learning. Active spatial learning refers to a specific set of situations where spatial information extracted from a novel place to learn can be actively explored and manipulated through physical effort (e.g. walking or biking) or cognitive effort (e.g. producing navigation choices). By opposition, passive spatial learning describes a situation of mere visual exposition to spatial material without any kind of physical or cognitive exploration. Components of active spatial learning are then divided into two categories: body-related activity and cognitive activity (P. N. Wilson et al., 1997). Although cognitive activity was shown to increase spatial learning performances through decision making (Voss et al., 2011) or attentional allocation (Hazen, 1982), in this work, we will specifically discuss contributions associated with body-related processes.

Most of the research on body-related active learning focused on sensory-motor components of physically walking in environments. Information gathered from locomotion is classically referred to as idiothetic information, composed by efferent motor commands and reafferent proprioceptive/vestibular feedback about self-motion, along with visual optic flow (Mittelstaedt & Mittelstaedt, 2001). Idiothetic information has been shown to improve spatial performances even with a symbolic locomotion apparatus such as a computer joystick (Péruch

et al., 1995) or a keyboard (Farrell et al., 2003). Conversely, several studies found no effect of this type of active symbolic locomotion on spatial learning (Christou & Bühlhoff, 1999; Gaunet et al., 2001; P. N. Wilson, 1999), thus suggesting that locomotion control does not contribute to spatial performances if motor implication is qualitatively different from legged locomotion (Chrastil & Warren, 2012; Proffitt, 2006). Active spatial learning research therefore started to investigate the contribution of podokinetic information, defined as efferent motor commands and reafferent proprioceptive feedbacks of the legs during walking (Weber et al., 1998). Early studies showed that actual walking in a real environment yields better spatial learning than walking in place (pawing leg motion) in virtual reality, which gives better results than using a joystick to control navigation (Grant & Magee, 1998). As it was found by comparing actual walking to wheelchair locomotion and video learning in real environments (David Waller & Greenauer, 2007), this effect does not depend on visual flow and field of view differences between virtual reality and real world. Realistic walking during spatial learning in virtual reality (using a treadmill) also improves performances in a spatial pointing task compared to joystick controlled learning (Chance et al., 1998).

These results suggest that podokinetic information is jointly used with optic flow for spatial updating, allowing to keep track of the body position in space in reference to surrounding landmarks (Rieser et al., 1986). Body-related information can also be beneficial to spatial learning in absence of confirmatory optic flow, as shown by classical results showing that blind or blindfolded individuals can extract precise distance estimations from walking only (Afonso et al., 2010; Loomis et al., 1993). The availability of podokinetic information for spatial updating allows better performances in triangle completion tasks (participants are led along two sides of a triangle then have to find the shortest way to come back at their starting point), thus facilitating path integration (Kearns, Warren, Duchon, & Tarr, 2002; Riecke, Van Veen, & Bühlhoff, 1999; Tcheang et al., 2011). However, it has been hypothesized that only the rotational component of body movement could be used for spatial updating, while translational component having little to no effect on it (Avraamides, Loomis, Klatzky, & Golledge, 2004). Podokinetic information seem to play an important role in spatial learning, yet it has been shown by a number of contradictory results that its contribution was strongly task dependent, notably according to the scale and difficulty of the environment to learn, and the frame of reference adopted during learning or retrieval.

3.2.1.2. *Task-dependent effects of podokinetic information availability.*

Recent works brought better understanding of the specific effect of podokinetic information during spatial learning. For example, Chrastil & Warren (2013) showed that actual walking improves survey knowledge of a novel virtual environment by increasing angular accuracy in a shortcut finding task between two positions compared to a vestibular only wheelchair condition. This beneficial effect of the translational component of walking locomotion seems to be present for free exploration tasks (Ruddle & Lessels, 2009; Ruddle, Volkova, Mohler, et al., 2011), whereas previous results dismissing its effects have been obtained during path following tasks (Avraamides et al., 2004), thus indicating that the importance of translational podokinetic information increases along with the complexity of the task. Following this idea, podokinetic information significantly facilitates distance and direction estimations when available during the learning of large-scale environments, but not small-scale environments (Ruddle, Volkova, & Bühlhoff, 2011; David Waller et al., 2004). Likewise, complex spatial layouts (such as obliquely structured environments) seem to potentiate the beneficial effect of podokinetic availability during learning (Ruddle & Péruch, 2004). However, differential effects of actively walking have been identified depending on the frame of reference adopted during spatial learning. For example, it seems that podokinetic information could contribute to route knowledge with egocentric frame of reference (Riecke, Cunningham, & Bühlhoff, 2007) more than survey knowledge in an allocentric, map-like frame of reference (Klatzky, 1998).

Other works showed that even though individuals seem to be able to construct both egocentric and allocentric representations from active learning if the task requires it (Iglói et al., 2009), they do not spontaneously tend to use allocentric frame of reference otherwise. This could be explained by the fact that it is more cognitively costly, and less automatic than “action-directed” egocentric representations in a first place (König, Goeke, Meilinger, & König, 2019). However, constructing an allocentric representation is intuitively more suited for large-scale environments because it allows the integration of metric properties (encoding of distances and angles). Thus, the beneficial contribution of podokinetic information for large-scale spatial learning could be obtained through redundancy between survey information and body-related information (Montello, 2009). Podokinetic information would then be responsible for better accuracy in learning metric properties, by completing allocentric

information about distances and angles with sensorimotor cues about perceived durations of travels and energy costs (Denis, 2018; Montello, 2009). This type of multimodal redundancy could finally lead to a decrease in the expense of cognitive costs associated with the construction of a large-scale spatial representation, concerning in particular the process of switching between egocentric and allocentric frames of reference. This idea leads to a more precise view on podokinetic effort, as mostly responsible for the integration of metric properties in large-scale spatial learning.

Previous research in the domain of active spatial learning was made according to the intuitive postulate that body-related information could add something to the construction of multimodal spatial representations (Tversky, 1993, 2003). Nonetheless, other explanations to the effect of podokinetic information during spatial learning could be proposed. On one hand, this effect could be due to a simple enactment effect or self-performed task effect (R. L. Cohen, 1981) due to the fact that performing actions serves as a more elaborative encoding strategy (Craik & Lockhart, 1972) and provide dual multimedia cues for helping retrieval (Baggett, 1984) independently of their spatial nature. On the second hand, walking effort could simply involve physiological arousal, responsible for better performances. In a non-spatial domain, walking before learning a list of words improved the subsequent retrieval performances, with participants being unaware of the memory benefits of the exercise (Salas et al., 2011). Generally, correctly dosed physical exercise has been shown to enhance memory performances (Madan & Singhal, 2012; Tomporowski, 2003) because of potential neural mechanisms linked with physiological arousal such as increased cerebral blood flow and increased brain neurotransmitter concentrations (Dinoff et al., 2017; Maddock et al., 2016). Therefore, it seems important to provide evidences for specific effects of podokinetic information on purely spatial components rather than global memory performances, in order to disambiguate these different explanations.

To fulfill this objective, we propose in the present study to observe the effect of podokinetic information associated with walking during spatial learning, but also during the retrieval of spatial representations (landmark positioning task on maps and route decision). We will compare participants who walked during the learning phase only (encoding group) to participants who walked during the retrieval phase only (retrieval group), participants who walked during both phases (encoding + retrieval group), and participants who did not walk (control group, passive learning). The idea is that if only the encoding group shows better

spatial performances than the control group, then we could assume that pokokinetic information influence the construction of a multimodal spatial representation (Tversky, 1993, 2003). Conversely, if all groups including the retrieval only group show better performances than the control group, contributions of mere physiological arousal to performances would not be possible to dissociate from specific effects on spatial representations.

3.2.2. Méthode

3.2.2.1. *Participants*

82 participants (62 females and 18 males) were recruited from the Faculty of Psychology of Paris Descartes University and from the cognitive sciences information platform (RISC/CNRS). Mean age was 22.31 (SD = 4.99). Among this sample, two participants were excluded for not observing instructions. All participants were in good physical condition and reported no cognitive difficulties or mental health impairment. They received either course credit or a participation gift for taking part to the study. They all gave their written informed consent for participating in this study, and were informed that they could stop the procedure at any time if they felt discomfort due to the physical activity or virtual reality. No participants reported such symptoms, and no experiment was stopped because of fatigue or motion sickness.

3.2.2.2. *Material*

Virtual Environments Six Virtual environments were used for this study. All of them were pretested and used in a previous work (Lhuillier, Gyselinck, Dutriaux, Grison, & Nicolas, 2018). Virtual environments consisted of fictional city districts (two-hundred meters scale). 3D road networks were created using 3DS Max, all materials were assembled using Unity game engine and the EditoMem software. Each environment contained 4 distinctive locations or buildings that we will refer to as landmarks (e.g. “train station”, “grocery store”). Each of them was designed to be visually and structurally unique compared to others so that participants would not mix them up during spatial learning. They were all urban-style environments featuring a high density of generic urban elements to increase the feeling of immersion and realism. The street networks were composed by two types of walkable roads: tarred streets and paved walkways (*see Figure 11*). No animated walking pedestrians or driving cars were used in these environments to limit attention catching biases on non-spatial information. Nevertheless, small groups of animated standing characters were placed in front

of every landmark, in order to increase the saliency of these places compared to non-target locations. Among these six virtual environments, five were used for target trials and one was used for training trials.



Figure 11 - Example of one of the virtual environments, as seen during video learning

Videos The learning phase of an environment was performed using a short video. Six videos were created (one for each environment). These videos were designed to be virtual tours of each environment: the camera was moving in a first-person perspective among the district, showing every street and landmark several times from different perspectives. The goal of these videos was to allow the construction of a global spatial representation from a single presentation. Each video lasted from 2 to 5 minutes. Each landmark was shown in the videos: in order to make sure that participants saw all landmarks and knew their lexical denomination, the camera stopped in front of them for one second and displayed the exact denomination of the landmark in white capital letters (e.g. “MUSEUM”, see Figure 12 for an example). The camera moving speed during the video was around a constant 8 kilometers per hour and its displacement was smooth (no implicit motor cues such as movement bobbing due to the avatar walking activity, for example). Video were presented on a large television screen (55-inch plasma television).



Figure 12 - Example of a landmark in a virtual environment, as seen during video learning

Walking Treadmill A simple unidirectional treadmill was used in this experiment. This device was a mechanical treadmill that participants activated by physically walking on the surface, allowing them to freely adjust their own walking speed. In this study, contrary to classical experiments on active learning (Chrastil & Warren, 2012), some participants had to walk during the retrieval phase (that is to say, the performance of spatial tasks). In order to make it possible to complete computer and paper and pencil tasks while physically walking, a shelf has been installed in the treadmill, in front of the participants. This shelf allowed participants to use a keyboard or to write answers on a paper map while walking in a comfortable setup (*see Figure 13*). No participant reported technical difficulties or lack of ergonomics to perform the tasks while walking in this setup. Handles were available on both side of the treadmill for participants to hold them while walking, but no specific instruction were given concerning these handles (they were free to use them or not).

Landmark Route Decision Task A computerized route decision task was created using the EPrime software. In this task, images of crossroads from the last visited environment were presented to the participants. For each image/trial, there was the name of a landmark at the bottom of the image and two arrows pointing towards two directions: participants had to decide which arrow/direction allowed them to get to the target landmark position using the shortest path (*see Figure 14*). Each image always displayed only one landmark and two route choices. Route choices could be either left, right, or front. All route

choices were clearly pointing towards a visible street in the image, without ambiguity. All images used for this task were taken from the learning videos (all crossroads shown have been already seen before). Participants answered using the directional arrows on a keyboard. They were forced to give an answer to progress toward the next trial. Even though no time-limit and no speed instruction were imposed, response time was recorded. There were 12 trials for each environment, each landmark of each environment was tested three times during the task and trials order was randomized.



Figure 13 - experimental setup using unidirectional walking treadmill. Video learning and tasks are displayed on a large screen television

Landmark Survey Positioning Task A landmark position retrieval task on a map was used to test whether the metric properties of environments were accurately preserved in the spatial representation. The task was the same that was used in a previous work (Lhuillier et al., 2018): six maps (one for each environment) were created, exclusively showing the street network in a survey perspective without any building or other spatial cues (dimensions = 15×15 cm). The maps were printed on a sheet of paper and participants were simply asked to write down positions for the four landmarks on the map using a pencil, by drawing a cross at the exact locations and writing down landmarks names (*see Figure 14* for an example of a map with actual positions of landmarks added).

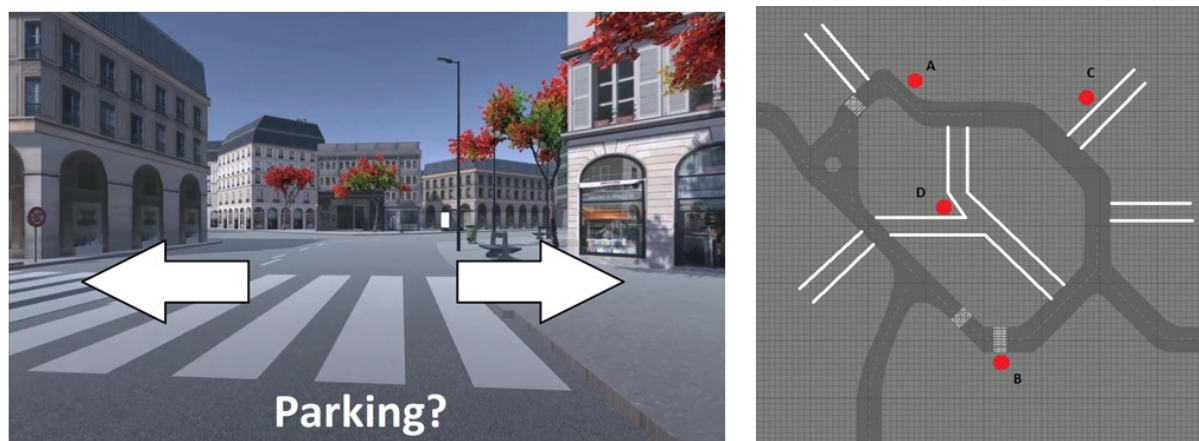


Figure 14 - Left side: example of an image used as a trial during landmark route decision task.
Right side: example of a map used during landmark survey positioning task, with actual positions of the four landmarks added

Questionnaires Two questionnaires were used in this study. The first questionnaire was created for a previous work (Lhuillier et al., 2018) and aimed to gather information about sport, walking and spatial tasks habits on a daily basis. It consisted of 16 items, 11 of them being 4-point scales (e.g. “How often do you use real-time planning devices or application (such as a GPS device) on a daily basis?” from zero being “not at all” to four being “every time”) and the other 5 being semi-open questions (e.g. “How many hours a week do you dedicate to sport activities?”). The final questions of this questionnaire aimed to assess participants’ perceived cognitive, physical and overall difficulty of the experiment.

The second questionnaire used in this study was the questionnaire on spatial representations (“QSR”; Pazzaglia, Cornoldi, & De Beni, 2000). This questionnaire consisted of 14 items on a 5 points scale and 2 items on a 3 points scale. This tool is used to part spatial preferences and abilities into specific sub-scales: global spatial abilities (general sense of direction, as estimated by the participant himself and according to feedbacks from his peers), preference for a more route-like perspective (first-person point-of-view, with the use of more egocentric strategies), preference for a more survey-like perspective (map-like format, with the use of more allocentric strategies) and other strategies using cardinal directions or visual landmarks features. In this study, we focus on route and survey preferences, as we expect that these preferences should modulate the influence of motor processes during spatial learning and retrieval. For more information on this questionnaire and elements of psychometric quality, see Pazzaglia et al. (2000).

3.2.2.3. *Design and procedure*

A between-subjects design was used, with participants being randomly assigned to only one of the four experimental conditions. The only difference between each condition was the moment when participants had to walk on the treadmill during the procedure: 1) walking during the learning phase (video presentation) 2) walking during the retrieval phase (spatial recall and solving of the tasks) 3) walking during both phases (learning + retrieval) 4) no walking (control group). Each condition comprised 19 to 21 participants and all participants were tested with 5 different virtual environments (+ 1 training environment). Our primary dependent measures were 1) landmark route decision average score (correct answers percentage) 2) landmark positioning on map average score (correct answers percentage). We used the GMDA software (Gardony et al., 2016) to compare the locations of the landmarks as given by participants to the Cartesian coordinate of the target map. This software performs pairwise comparisons between landmarks to output various quantitative measures among which we chose “Correlation”, “Distance Accuracy”, “Angle Accuracy” and “Scale” as dependent measures. “Correlation” is a simple Bravais-Pearson coefficient obtained by comparing coordinates given by participants on the test map to the actual coordinates of the reference map. “Distance Accuracy” compares pairwise distances between landmarks and provides a summed-up proportional score for all distances ranging from 0 to 1, where larger scores indicate more accurate representation of distances between landmarks. “Angle Accuracy” reflects the global magnitude of interlandmark angular errors and is also ranged from 0 to 1 (the higher the score, the better the accuracy of angles from one landmark to another). “Scale” measures the direction of interlandmark distances errors on the sketch map and can give useful information about to which extent participants tend to compress metric properties (average distances are recalled as shorter than the reference map) or expand them (average distances are recalled as longer than the reference map). For more information on these measures, see Gardony, Taylor and Brunyé (2016). *2.4 Procedure*

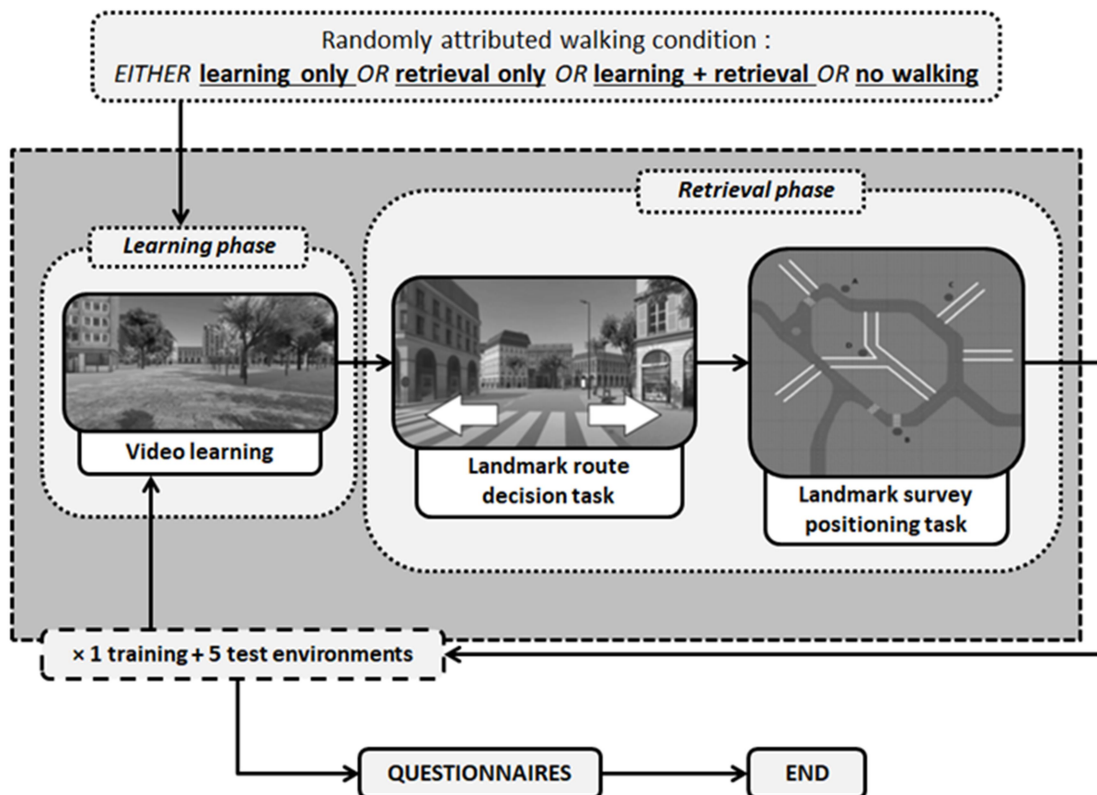
Each participant was tested individually for about an hour. After communicating their sociodemographic information and signing a legal consent, they were informed that the study would deal with spatial memory tasks similar to those they perform in their everyday activities. They then took place on the treadmill. Even though control participants never walked during the procedure, they did all the experiment standing on the treadmill (with the mechanism blocked). Participants were then submitted to the training environment, which

followed the exact procedure repeated for target environments: 1) video learning of the environment) 2) landmark route decision task 3) landmark survey positioning task. Video presentation of the environment corresponded to the learning phase, whereas landmarks route decision and survey positioning tasks corresponded to the retrieval phase (*see Figure 15*). Depending on the assigning to one of the four experimental conditions, participants could either walk during the learning phase, the retrieval phase, both phases or simply never walk during the whole experiment. This condition was maintained for all the five environments, including the training environment.

After completing the training environment, participants were then presented the five target environments in a randomized order. During the learning phase, participants were instructed to especially pay attention to spatial cues and global street network, as they would have to recognize crossroads and position landmarks on a map later. The video was then presented and the experimenter remained silent until it ended. At the end of the video, the experimenter placed a keyboard on the shelf in front of the participant and started the program for landmark route decision task. Instructions for this task were both presented visually by the program and read by the experimenter. Participants were asked to choose the shortest route for each image of an intersection in order to get to the specified landmark; no time limit was imposed. After the participants had answered to the twelve trials, the keyboard on the shelf was replaced by a paper map of the environment for the landmark survey positioning task. They were informed that they would have to draw a cross on the map for each of the four landmarks seen during the video, mentioning above each cross the name of the landmark. The experimenter then provided the location and the orientation of the camera at the start of the video, and let participants solve the task without further help. No time limit was imposed. After the participants signaled to the experimenter that they positioned the four landmarks, a quick feedback was given on the actual positions of the landmarks. The experimenter then informed the participants that they would learn a new environment, and that they could forget the previous one as it would not be tested anymore for the rest of the experiment. Participants were free to take a short break after the completion of each environment, and the experimenter invited them to take a longer break at the end of the third environment in case they felt slight signs of fatigue. After completion of the last environment, participants were asked to come down from the treadmill and to sit on a table, where they filled the two questionnaires.

Figure 15 - diagram summarizing the procedure

3.2.2.4. Statistical Analyses



All analyses were performed using R software 3.4.0 (R Development Core Team, 2017). We performed multiple linear mixed-effects regressions with the lme4 package 1.1-8 (Bates, Mächler, Bolker, & Walker, 2015) using the between-subjects factor (“moment of walking”, with four independent modalities) as a fixed effects factor. As we expected an important effect of route and survey preference in the performance of spatial tasks we also used these two sub-scales of the QSR (Pazzaglia et al., 2000) as additional fixed effects factors in our models. The random effects structure included random intercepts for participants, items (virtual environments), rank of the items (to control for learning effects), age of participants, self-reported global spatial abilities (from the QSR) and self-reported walk hours per day (in order to control for discrepancies in spatial abilities linked with locomotion among participants). All models used the non-walking group as a control baseline condition to compare all other groups with. As we did not have any hypothesis regarding the existence of interaction effects in this protocol, we only used standard multiple linear mixed-effects regressions without interaction between predictors. We then tested our models with

analyses of variance (ANOVA) in order to assess the existence of main effects, using Satterthwaite approximations for degrees of freedom (Satterthwaite, 1946). This analysis procedure was repeated for six dependent measures: landmark route decision average score (from the computerized route decision task), landmark survey positioning average score (from the landmark positioning task on map), “Correlation”, “Distance Accuracy”, “Angle Accuracy” and “Scale” (calculated with the GMDA software from the coordinates of the landmark positioning task on map, see the *Design* part). These four last measures were transformed using the Tukey’s Ladder of Powers Transformation (Tukey, 1977) in order to tackle the skewness of their distributions. Each model was tested for outliers (influential observations) using the Cook’s Distance method (Cook & Weisberg, 1982), allowing to detect abnormally deviating values and extract them from models. We adopted a classical cut-off value of $Di > 4/n$ to extract abnormally influential observations (Bollen & Jackman, 1990), where “ Di ” is the cook distance of an observation and “ n ” is the total number of observations.

3.2.3. Résultats

Group Matching Although attribution of participants to one of the four groups (moment of walking) was randomized, we checked afterwards that all groups were similar in terms of various control measures. All groups were matched regarding age ($F_{(3,76)} = 0.35, p. = .79$), height ($F_{(3,76)} = 0.99, p. = .40$) and weight ($F_{(3,76)} = 0.82, p. = .49$). Additionally, all groups were equivalent regarding daily walking frequency ($F_{(1,74)} = 0.64, p. = .59$). They did not exhibit differences in the exposition to the use of maps ($F_{(3,76)} = 0.99, p. = .40$). Finally, the four groups did not differ in their estimation of cognitive difficulties they experienced while performing the tasks ($F_{(3,76)} = 1.43, p. = .24$), but a significant difference was found in the estimated physical difficulty of the task ($F_{(3,76)} = 2.98, p. = .04$). This difference is explained by the fact that the encoding + retrieval group estimates a higher physical cost than the other groups. Note that the estimated physical cost for this group is still very low ($M_{encoding+retrieval} = 0.68$) and do not exceed the value of 1 in a 5 points-scale (1 corresponding to “not very difficult”). We can consequently conclude that all four groups estimated the physical and cognitive cost of the experiment very low. For a summary of these variables with means for each condition, see *Table 1*.

Landmark Route Decision Task A single trending coefficient was observed in this score regarding the difference between control group and retrieval phase walking group ($\beta = -.062, SE = .033, t = -1.884, p. = .06$), suggesting that walking during retrieval impaired

performances ($\bar{M}_{\text{retrieval}} = .706$, $SD = .14$; $\bar{M}_{\text{control}} = .772$, $SD = .15$). Regarding perspective, both route ($\beta = .012$, $SE = .006$, $t = 2.449$, $p = .018$) and survey ($\beta = .012$, $SE = .004$, $t = 3.447$, $p < .001$) preferences were linked to performances: as both perspective preference increased, performance in the landmark route decision task increased along.

Landmark Survey Positioning Task A significant coefficient was found for learning phase condition in the regression model ($\beta = 28.67$, $SE = 8.47$, $t = 3.383$, $p = .001$), indicating that learning phase condition group obtained significantly higher performances than control group ($\bar{M}_{\text{learning}} = 71.12$, $SD = 24.94$; $\bar{M}_{\text{control}} = 56.75$, $SD = 34.06$). The same effect was found between learning+retrieval group and control group ($\beta = 22.35$, $SE = 8.74$, $t = 2.557$, $p = .014$; $\bar{M}_{\text{learning+retrieval}} = 71.76$, $SD = 25.53$, see Figure 16). Analysis of variance revealed a significant main effect of the survey perspective preference ($F_{(1,57.517)} = 11.41$, $p = .001$) and the route perspective preference ($F_{(1,48.86)} = 18.85$, $p < .001$), indicating that both these strategies allowed participants to enhance their performances (the higher the score in each scale, the higher the performances on the landmark survey positioning task). A significant main effect of the walking phase condition was found with the ANOVA ($F_{(3,49.2)} = 5.59$, $p = .002$). In order to breakdown this main effect we performed post-hoc comparisons using orthogonal user-defined contrasts. This procedure notably allowed examining an effect that was not described in the regression model: comparing the groups that walked during the learning phase (learning phase only group and learning + retrieval phases group) with the groups that did not walk during learning (control group and retrieval phase only group), in order to disentangle the effects of walking during encoding or during retrieval. We observed a significant effect of this contrast ($\beta = 49.4$, $SE = 12.24$, $t = 4.035$, $p < .001$) suggesting that the main positive effect of walking in the landmark survey positioning task was specifically attributable to walking during the learning phase.

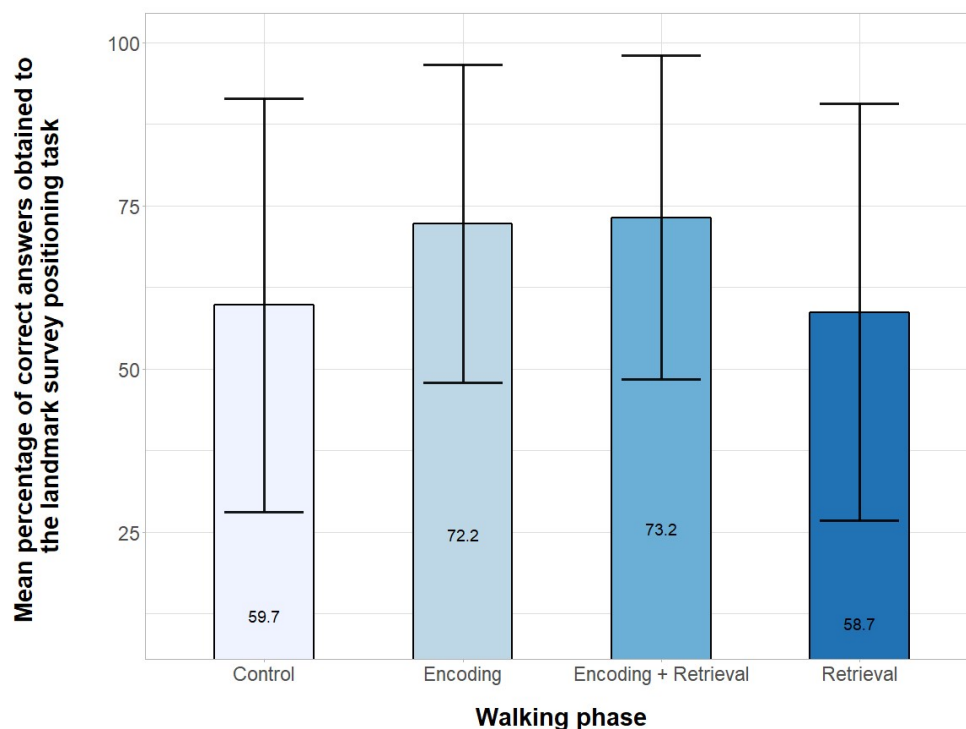


Figure 16 - mean percentages of correct answers obtained to the landmark survey positioning task for each independent walking phase group

Correlation Analysis of correlation between actual landmark positions and positions retrieved by participants showed a significant coefficient for walking during learning phase ($\beta = .173$, $SE = .06$, $t = 2.86$, $p = .006$) and during learning + retrieval ($\beta = .157$, $SE = .062$, $t = 2.54$, $p = .014$). Both these coefficients predicted best performances compared to control group ($\bar{M}_{\text{control}} = .872$, $SD = .162$; $\bar{M}_{\text{learning}} = .943$, $SD = .066$; $\bar{M}_{\text{learning+retrieval}} = .935$, $SD = .08$, see Figure 17). Analysis of variance for this model consequently showed a significant main effect of walking phase condition ($F_{(3,61.282)} = 3.64$, $p = .017$). Orthogonal user-defined contrasts allowed us to breakdown this effect and confirmed that walking during learning phase (learning group and learning + retrieval group) significantly increased performances compared to control and retrieval walking group ($\beta = .265$, $SE = .086$, $t = 3.071$, $p = .003$). No significant coefficient associated with route perspective preference was found for this measure ($\beta = .014$, $SE = .012$, $t = 1.16$, $p = .25$), but a trendy coefficient was found for survey perspective preference ($\beta = .012$, $SE = .006$, $t = 1.73$, $p = .089$).

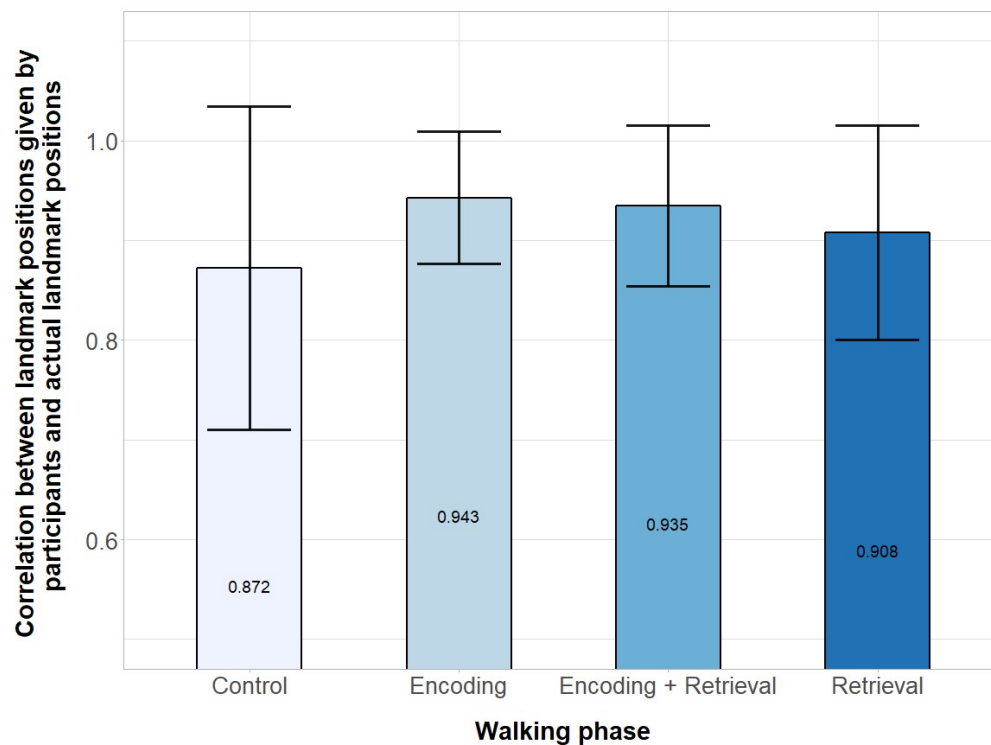


Figure 17 - mean correlations between landmark positions given by participants and actual landmark positions during the survey positioning task, for each independent walking phase group (computed with the GMDA software)

Distance Accuracy A significant coefficient was found regarding inter-landmark distance accuracy for the learning + retrieval group ($\beta = .067$, $SE = .033$, $t = 2.05$, $p = .044$; $\bar{M}_{\text{learning+retrieval}} = .887$, $SD = .06$; $\bar{M}_{\text{control}} = .859$, $SD = .07$). Walking during the learning phase only showed a trendy coefficient ($\beta = .055$, $SE = .031$, $t = 1.79$, $p = .078$), as well as walking during retrieval only ($\beta = .058$, $SE = .033$, $t = 1.76$, $p = .083$). Analysis of variance showed a tendencial effect regarding the walking condition ($F_{(3,69.53)} = 1.82$, $p = .15$). As coefficients in the regression model and main effect in the ANOVA were close to the conventional significance threshold, we used orthogonal user-defined contrasts to gather more information about the underlying effects of these tendencies. Contrasts analysis assessed that mean distance accuracy was significantly lower for the control group compared to participants who walked during the learning phase (learning group and learning + retrieval group; $\beta = -.061$, $SE = .027$, $t = -2.25$, $p = .028$). Survey perspective preference significantly improved distance accuracy ($F_{(1,62.23)} = 3.1$, $p = .029$). No effect of route perspective preference was observed for this measure ($F_{(1,69.06)} = 1.34$, $p = .25$).

Angle Accuracy A significant coefficient was found regarding inter-landmarks angular accuracy for learning + retrieval phase walking group ($\beta = .109, SE = .048, t = 2.249, p = .029$). Analysis of variance confirmed the existence of a significant main effect of walking phase condition ($F_{(3,49.64)} = 4.13, p = .011$). Breaking down this main effect using orthogonal user-defined contrasts, we observed that walking during the learning phase (learning only group and learning + retrieval group) significantly increased angular accuracy compared to control group and retrieval only group ($\beta = .217, SE = .065, t = 3.33, p = .001; \bar{M}_{\text{learning}} = .875, SD = .114; \bar{M}_{\text{learning+retrieval}} = .886, SD = .106; \bar{M}_{\text{control}} = .842, SD = .136; \bar{M}_{\text{retrieval}} = .837, SD = .139, \text{ see Figure 18}$). Analysis of variance showed no significant main effect of route perspective preference for this measure ($F_{(1,54.81)} = 1.089, p = .301$), but a significant main effect of survey perspective preference was observed ($F_{(1,48.36)} = 6.35, p = .015$), suggesting that high preference for survey perspective was linked with better angle accuracy.

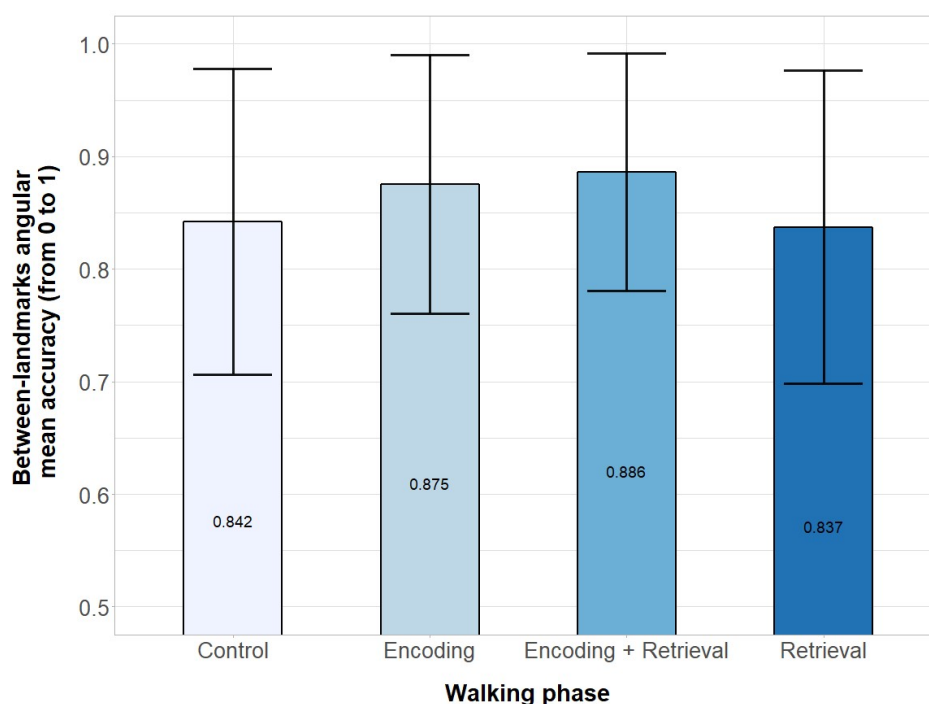


Figure 18 - mean global angular accuracy between landmark positions given by participants compared to actual landmark positions, for each independent walking phase group (computed with the GMDA software, ranged from 0 to 1)

Scale We used the Scale measure from the GMDA software (Gardony et al., 2016) to analyze the nature of positioning errors during the landmark survey positioning task. It allows gathering information about the metric properties of the spatial representation and the

compression/expansion of global distances. Results showed that although all participants tended to compress distances, the learning + retrieval group compressed distances significantly less than the control group ($\beta = .14$, $SE = .061$, $t = 2.3$, $p = .025$; $\bar{M}_{\text{learning+retrieval}} = .861$, $SD = .123$, $\bar{M}_{\text{control}} = .79$, $SD = .201$), but this did not yield a significant main effect of walking condition in the analysis of variance ($F_{(3,65.37)} = 1.79$, $p = .16$). Again, as main walking phase effect was close to significance threshold we conducted user-defined contrasts analysis to breakdown underlying effects. Contrasts analysis yielded a significant coefficient regarding the difference between control group and participants who walked during the learning phase (learning group and learning + retrieval group), suggesting that walking during the learning phase led to less compression of inter-landmarks distances ($\beta = -.105$, $SE = .05$, $t = -2.07$, $p = .042$). Significant effects of survey perspective preference ($\beta = .027$, $SE = .007$, $t = 4.15$, $p < .001$) and route perspective preference ($\beta = .024$, $SE = .011$, $t = 2.06$, $p = .042$) were found.

3.2.4. Discussion

The aim of the present study was to disambiguate the effect of active spatial learning on the quality of spatial representations from the beneficial effect of physiological arousal. We compared spatial learning for large-scale complex virtual environments while podokinetic information was available either during the learning or the retrieval of the spatial representation. Results showed that performances in a landmark positioning task on a map were better for participants who walked during the learning phase, with no effect of walking during the retrieval phase. Quantitative geometric analysis of the positions retrieved by participants on maps shows that walking during the learning phase significantly improved the correlation between retrieved positions and actual positions, compared to the absence of walking or walking only during retrieval. More precisely, inter-landmarks angle and distance accuracy were both increased for participants who walked during the learning phase or during both the learning and the retrieval phase, compared to participants who never walked or walked only during the retrieval phase.

These results suggest that podokinetic information participates in the construction of the spatial representation during learning, because the mere physical activity during retrieval was not sufficient for improving spatial performances. Hence this effect is not attributable to physiological arousal). Furthermore, podokinetic information during learning is yet again proved to affect metric properties of the spatial representation (angular and distance

accuracy), confirming the idea of a redundancy between survey perspective geometry cues and time travel/effort cost information derived from walking (Denis, 2018; Montello, 2009). Conversely, we failed to observe a benefit of walking during the learning phase for the landmark route decision task. Considering individual differences for route and survey perspectives, the results suggest that the effect of podokinetic information could be specific to switching between an egocentric to an allocentric frame of reference. Preference for route and survey format of representation indeed had a beneficial effect on angle accuracy on maps and performances to the landmark route decision task. On the other hand, route perspective preference had no effect on distance accuracy in the landmark positioning task on a map, while survey preference influenced it. This seems to suggest that angle accuracy refers to spatial updating processes just like in the route decision task (rotational component of actualizing the body position in space, relative to landmarks), whereas distance accuracy is more related to the translational component of podokinetic information. This is in line with previous results showing that only translational component of active walking improves distance estimations in complex large-scale environments (Chrastil & Warren, 2012, 2013; Ruddle, Volkova, & Bühlhoff, 2011), but using perspective preference as a novel clue to investigate the interaction between frames of reference and body-related processes. It is important to note that survey perspective preference has been identified as highly correlated with global spatial abilities (Pazzaglia & Meneghetti, 2017), thus explaining the fact that it is always linked with better performances (in egocentric and allocentric format tasks).

Regarding the difference between physically active learning and physically active retrieval, contrasts analyses showed that walking during learning and walking during both the learning and the retrieval phases provide the exact same outcomes. It seems in fact that the performances of participants in these conditions are similar, thus suggesting that only walking during spatial learning have an effect on correlation, angular accuracy and distance accuracy, but walking during retrieval has strictly no effect on spatial performances. The only exception is the route decision task on which walking seems to have no effect compared to the control group. This absence of effect can be explained by the specific demands of the task: participants had to recall the visual image of the place shown in the photography (which is more of an episodic memory process), then decide if a landmark was left or right. To do so, participants had to perform a spatial updating task of imagining where a specific place is located in reference to their body orientation. This task mostly involves the rotational component of idiothetic information, which explains why translational information derived

from omnidirectional treadmill walking had no effect. It would be interesting to change this egocentric frame of reference task to a more translational-component driven task such as a blind walking task (to estimate travel time between a starting point and a landmark) in future works. It is to be expected that the task to be performed for spatial recall would modulate the effect of podokinetic information availability in egocentric perspective tasks.

It is also interesting to note that groups that walked during learning (learning and learning + retrieval groups) showed less variability in the extent of their performances than the control group or the retrieval only group, for all measures excepted route decision task mean scores. This observation suggests that walking during spatial learning could also orient participants' strategies toward more relevant ways to solve the task, especially in an allocentric format of representation. In fact, the participants in other conditions could have used different learning and retrieval strategies (some of which being more or less adapted), while experimenting the novel environment with the addition of body-related information could have narrowed the extent of possible strategies towards a well-suited way of solving the present task. For example, orienting the attention of participants towards the activity of physically walking could have guided them to use motor simulation during retrieval. Motor simulation is defined as a process of action simulation, an internal representation of motor programs without overt movement (Jeannerod, 2001). Motor simulation has been proved to be implicitly used for estimating distances while reading an egocentric perspective spatial text (Brunyé, Mahoney, & Taylor, 2010), but is also involved in the switching between egocentric and allocentric perspectives during landmark positioning tasks on maps (Lhuillier et al., 2018). Our results seem to suggest that experiencing the environment while walking could promote recall modes linked with the body-related component of exploration, such as conscious or unconscious motor simulation. This assumption is in line with classical theories such as the encoding specificity framework (Thomson & Tulving, 1973), stating that memory performances during retrieval is better if learning and retrieval phases contexts are matched. In this case, motor simulation could be seen as a reminiscent context of actual walking, thus potentiating the connection between body-related information and metric properties in the spatial representation. However, our results can not suffice in themselves to assert that motor simulation is universally used as a retrieval mechanism, because we did not observe any interference effect between actual walking and imagined walking. Embodied and situated theories of cognition are subtended by numerous empirical observations that cognitive processes recruit modal areas of the brain to simulate motor processes (Barsalou, 2008). If

that is the case, actual walking in our experiment should overlap with neural networks recruited for motor simulation of physical walking: we then would have observed an interference effect characterized by a decrease of performances in the active retrieval group compared to the control group. Likewise, performances should have been lower for the active learning and retrieval group compared to the only active learning group. This absence of interference between potential motor simulation of walking and actual walking may inform us that these two activities are functionally too different to overlap. However, studies carried out in the field of imagined walking found that imagined walking share biomechanical characteristics with actual walking and implies motor simulation (Jeannerod, 1999; Kunz, Creem-Regehr, et al., 2009; Papaxanthis et al., 2002). Stevens (2005) found that biomechanical information conflicting with locomotion (such as interfering stances) had a negative impact on imagined walking times, making them shorter. We can then assume from these results that actual walking as an automatic process can't interfere with motor simulation during spatial retrieval because the conflict between those two activities is not strong enough. It would be interesting for future works to investigate the effect of interfering stances on complex spatial retrieval after active learning, in order to observe possible effects of metric distortions linked with motor simulation interference.

Lastly, we failed to observe insightful patterns regarding the effect of podokinetic information on global expansion/compression of distances: the only significant coefficient was linked with the encoding + retrieval walking group estimating significantly larger distances than all other groups. This is explained by the fact that this specific group walked more than all other conditions, thus higher total physical cost associated with body-related clues most likely conducted them to estimate larger distances. Although this result does not provide information about the direction of the increase in distance accuracy for learning walking groups, it is in line with the idea that podokinetic effort would be computed as travel cost information in the spatial representation (Denis, 2018; Montello, 2009). This assumption find support in the field of distance perception where numerous empirical studies observed that actual physical cost lead to overestimate distance judgments (Proffitt et al., 2003; White et al., 2013). Our results suggest that post-hoc processes of physical cost estimation could influence distance retrieval from spatial representations as well.

Overall, it is safe to say that our results confirm embodied and situated views of spatial cognition by assessing that podokinetic information is encoded during learning and could

participate to the consolidation of the metric properties of the spatial representation. It is also crucial to point out that the specific tasks and formats of representation used in this study influenced the use of body-related information: as stated by Galati et al. (2000), distances are automatically computed in an egocentric perspective when the task implies goal-directed action (which was not the case in our study), allocentric perspective is then preferred when the task demands to encode metric relations between objects. In our paradigm, participants were warned that they would have to recollect spatial positions; hence they probably chose (consciously or not) to invest allocentric frames of reference. This would be opposed to previous works showing systematic tendencies towards a specific format of representation (König, Goeke, Meilinger, & König, 2019) or relative inadequacy between podokinetic information and survey perspective (Klatzky, 1998). Instead, we showed that even when using allocentric driven strategies, participants could benefit from the availability of podokinetic information during learning, thus contributing to integrative multimodal views on spatial representations (Tversky, 1993) and task-dependence of preferentially used perspectives (Iglói et al., 2009). This approach of spatial cognition fits well with the intentional weighting theory (Hommel, 2017), which main hypothesis is that complex tasks further top-down control mechanisms aiming to increase the importance of empirical features experienced during the initial exposition with the material. The implication of this view is that the saliency of podokinetic information could be more important during complex active spatial learning, thus promoting the retrieval of body-related features that help access metric properties of the spatial representation (possibly through motor simulation). Overall we provide novel arguments toward an integrative view of spatial learning, emphasizing how empirical features experienced during active learning and specific demands of the task can shape spatial representations.

3.3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

- **Les participants ayant marché durant l'encodage seulement et durant l'encodage et la récupération présentent des performances semblables lors du rappel de positions spatiales sur cartes.** Ce résultat suggère que la disponibilité des informations podokinétiques lors de l'encodage puis lors de la récupération ne suffit pas à améliorer significativement les performances mnésiques par un effet de spécificité à l'encodage (Thomson & Tulving, 1973). Il semble donc que les similitudes de contexte sensorimoteur ne soient pas suffisantes pour potentialiser les processus de mémoire (comparé au contexte environnemental par exemple, voir Godden & Baddeley, 1975). De plus, le groupe ayant marché à la fois durant l'encodage et la récupération ne montre aucun signe de détérioration des performances dues à la fatigue, ou d'augmentation des performances dues à un état d'éveil physiologique plus important.
- **Les performances des participants n'ayant jamais marché et ayant marché durant la récupération seulement sont globalement semblables.** Ceci semble suggérer que la marche durant la récupération n'interfère pas avec des éventuels mécanismes de simulation sensorimotrice participant au rappel (auquel cas le groupe récupération aurait été plus faible que le groupe contrôle). A l'inverse, marcher durant la récupération ne semble pas non plus amorcer de stratégies optimales pour réussir la tâche (auquel cas, le groupe récupération aurait été meilleur que le groupe contrôle).
- En conséquence des deux précédents points, **les informations podokinétiques semblent donc bien intervenir fonctionnellement dans la construction de la représentation spatiale.** Ces observations renforcent l'idée d'une représentation spatiale multimodale (Tversky, 1993, 2003), mais également de différents formats en fonction de différentes tâches et/ou perspectives (Iglói et al., 2009). Il s'agit également d'une réplique de travaux classiques sur l'apprentissage actif facilitateur lors de tâches allocentrées (Ruddle, Volkova, & Bühlhoff, 2011), traitant d'environnements à large-échelle et complexes (Mellet et al., 2010). Grâce à l'utilisation de la réalité virtuelle et la présentation de vidéos nous avons pu isoler la contribution des informations podokinétiques en maintenant constant le flux optique et la quantité d'informations visuelles (dans la continuité de Waller & Greenauer, 2007). Il est important de signaler sur ce point que l'effet facilitateur des informations podokinétiques lors de l'apprentissage spatial a été observé en l'absence

de coordination exacte entre flux optique et vitesse de la locomotion, en désaccord avec les modèles classiques de l'organisation perceptivo-motrice (Rieser et al., 1995).

- **L'effet facilitateur de la marche sur les performances spatiales concerne ici principalement la précision des propriétés métriques de la représentation lors d'une tâche de positionnement de coordonnées sur carte.** Ce résultat va dans le sens de certaines études ayant déjà observé un lien entre informations podokinétiques et précision des propriétés métriques (Waller et al., 2004) Cette contribution spécifique à une dimension précise de la représentation spatiale est intéressante car elle ne concerne que la précision globale, et non la direction de l'estimation des distances par exemple : marcher durant l'encodage contribue à ce que la forme de la représentation (distances et angles) ressemble plus à la forme du lieu réel (particulièrement visible sur le calcul de la corrélation entre positions), mais n'introduit pas de biais systématique lié à la consommation d'énergie (par exemple, une surestimation globale des distances). Nous pouvons tout de même mentionner que le groupe ayant marché durant l'encodage et durant la récupération semble sous-estimer légèrement moins les distances que tous les autres groupes : il est possible que le niveau de dépenses métaboliques de ce groupe soit légèrement sous-liminaire par rapport à la quantité d'énergie dépensée nécessaire pour voir apparaître des biais liés à l'économie d'action (Proffitt, 2006). Afin d'affirmer que la contribution des informations sensorimotrices à l'apprentissage spatial s'inscrit dans une approche écologique de la mémoire spatiale, l'étude 2 aura pour objectif de déterminer si la dépense énergétique influence les performances en mémoire spatiale.

4. ETUDE 2 : AUGMENTER LA SENSATION D'EFFORT PHYSIQUE DE LA LOCOMOTION AVANT L'ENCODAGE ALTERE LES PERFORMANCES SPATIALES

4.1. OBJECTIFS

Les résultats de l'étude précédente nous permettent de penser que les informations podokinétiques sont intégrées à la représentation spatiale lors de l'encodage, et influencent ses propriétés métriques. Si la disponibilité d'informations podokinétiques aide à mémoriser les propriétés métriques du lieu, nous pouvons à présent nous demander comment la représentation évolue en fonction de la qualité de ces informations. Les approches de la mémoire et de la perception dirigées vers l'action (Coello & Delevoeye-Turrell, 2007; Gibson, 1979; Glenberg, 1997; Proffitt, 2006) postulent que l'espace est catégorisé en fonction des capacités d'action qu'il offre. Par conséquent, la fonction d'une représentation spatiale devrait être de sous-tendre le comportement en préparant l'organisme à l'action (Franklin & Tversky, 1990). Dans le cadre de représentations spatiales dérivées d'environnements complexes à large-échelle, le principal comportement en question est la locomotion (Montello, 1993; Tversky, 2003). Il semble donc logique sur le plan purement évolutionniste que les informations podokinétiques influencent les propriétés métriques de telles représentations, puisque les paramètres de la marche doivent être estimés à partir des propriétés de l'espace.

Toutefois, une autre caractéristique d'une approche évolutionniste serait la prise en compte du principe d'économie à l'action (Proffitt, 2006), qui prédit que l'engagement dans des comportements impliquant une dépense énergétique importante ou non optimale devrait être minimisé par l'organisme. Parmi les moyens dont dispose l'organisme pour appliquer ce principe d'économie aux comportements de locomotion, nous avons décrit la surestimation des distances immédiates (p. ex. p. 99). Ainsi nous pouvons nous demander s'il existe un lien direct entre la dépense énergétique associée à la locomotion, et les propriétés métriques encodées dans la représentation spatiale.

L'un des moyens de répondre à cette question serait d'investiguer les effets d'un recalibrage de l'effort physique de marche sur les performances en mémoire spatiale. En effet,

nous avons vu précédemment que le processus d'estimation des propriétés métriques était fortement dépendant de l'interaction entre le flux optique et les informations podokinétiques, et que recalibrer ce processus en modifiant la dépense énergétique de la marche pouvait biaiser la perception des distances (Lessard et al., 2009). En dépit de quelques observations princeps (p. ex. Okabe et al., 1986), nous ne disposons actuellement pas d'arguments nous permettant d'affirmer que cet effet pourrait être encodé en mémoire et influencer les propriétés de représentations spatiales multimodales. Le premier but de cette seconde étude sera donc de montrer comment le recalibrage de l'effort physique de locomotion impacte les performances de mémoire spatiale, du fait d'une distorsion des propriétés métriques causée par le principe d'économie à l'action.

Cette deuxième étude tentera également de réunir des arguments en faveur de l'utilisation de la simulation sensorimotrice lors de la récupération de la représentation spatiale. En effet, si la représentation spatiale intègre des symboles perceptifs multimodaux, et que ceux-ci sont rendus conscients par le biais de la simulation sensorimotrice (Barsalou, 1999; Coello & Delevoeye-Turrell, 2007), la simulation sensorimotrice (de l'activité sensorimotrice de locomotion) devrait participer à la récupération de l'information spatiale. L'un des moyens d'explorer une forme de simulation sensorimotrice de la marche est d'observer ses effets sur la marche imaginée (Kunz, Creem-Regehr, et al., 2009). Bien que la marche imaginée partage des caractéristiques biomécaniques et temporelles avec la marche réelle (p. ex. Papaxanthis et al., 2002), il a été montré que le recalibrage de l'effort de marche par le port de poids supplémentaire impactait la vitesse de marche imaginée, mais pas la vitesse de marche réelle (Decety et al., 1989). Ainsi observer l'effet d'un effort physique additionnel sur le processus de simulation sensorimotrice de la marche, lors du rappel d'informations spatiales en mémoire pourrait éclairer les processus en jeu. Pour ce faire, nous proposons d'utiliser une tâche complexe et réaliste de planification d'itinéraires (Wiener, Büchner, & Hölscher, 2009), dans laquelle la simulation sensorimotrice de la marche est possiblement impliquée (Grant & Magee, 1998). Le dernier but de cette étude sera de tester l'hypothèse selon laquelle le recalibrage de l'effort de marche pourrait induire une modification de la vitesse de marche imaginée/subjective (Decety et al., 1989), impactant possiblement le processus de simulation sensorimotrice lors de la planification d'itinéraire en modulant son temps de résolution. Un tel résultat permettrait de penser que la planification d'itinéraire à partir d'informations spatiales stockées en mémoire implique un processus de reviviscence sensorimotrice de l'activité de marche.

4.2. ARTICLE 2

“Like a Ball and Chain”: Altering locomotion effort perception distorts spatial representations

Simon Lhuillier^{a,b}, Valérie Gyselinck^c, Léo Dutriaux^{a,b}, Elise Grison^c & Serge Nicolas^{a,b}.

^a *Laboratoire Mémoire et Cognition, Institut de Psychologie, Université Paris Descartes, France*

^b *IFSTTAR - LPC, Versailles, France*

ABSTRACT

This study aimed at demonstrating the role of sensorimotor information through the influence of walking effort perception on the process of route planning for navigation. Participants were asked to walk wearing weighted or non-weighted ankle belts prior to learning virtual environments. They then had to plan routes between landmarks and to estimate travel times and distances for each route. Results newly showed that loaded ankle weights made participants underestimate their own self-reported walking speed compared to the non-loaded participants. In addition, participants with low spatial ability tended to spend more time planning their route when wearing weighted belts than with non-loaded belts. Loaded ankle weights also negatively affected performances on a spatial memory task: landmark position retrieval on a map. These results provide support for embodied views of spatial cognition.

KEYWORDS: *embodied cognition, spatial cognition, route planning, virtual reality*

Lhuillier, S., Gyselinck, V., Dutriaux, L., Grison, E., & Nicolas, S. (2018). “Like a ball and chain”: Altering locomotion effort perception distorts spatial representations. *Journal of Environmental Psychology*, 60, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2018.10.008>

4.2.1. Introduction

Embodied views of cognition argue that cognitive processing is strongly intertwined with action-related mechanisms, instead of only amodal representations (Barsalou, 2008). A large body of literature has demonstrated the influence of body-related information on perception (Symes, Ellis, & Tucker, 2007; Tucker & Ellis, 1998) or even language comprehension (e.g. : Glenberg & Kaschak, 2002). In the field of spatial cognition, some studies also strongly suggest that space perception could be shaped by body experiences and motor actions (e.g. Franklin & Tversky, 1990), but they mainly focused on immediate “around the body” space (Tversky, 2009), and perceptual tasks that are only a part of spatial processes. Our aim in this study is to provide new insights into an embodied view of spatial cognition by studying the influence of effort perception in large-scale realistic spatial processing, which implies the use of locomotion (Montello, 1993). To do so, we will focus on a specific type of spatial task which has not been studied yet in an embodied framework: complex route planning. This work also gathers information about motor imagery processes, and especially how it can be influenced by effort perception. In a first part, we will report previous works on embodied spatial cognition dealing with the influence of motor-related processes during the encoding of spatial representations. We will then present how physical effort manipulation can influence spatial processing through motor imagery. Lastly, we will present the field of route planning, and how its study would add new elements to embodied spatial cognition.

4.2.1.1. *The integration of podokinetic information during spatial learning*

Spatial representations have been traditionally described as images of previously visited places, including information about Euclidian metrics in a two dimensional space (Baird, 1979). This view is derived from the concept of cognitive maps (Tolman, 1948). The assumption of cognitive maps as a coherent spatial layout of landmarks and metric properties is debated nowadays, especially because it appears too costly in terms of cognitive resources. McNamara (1986) provided evidence for a hierarchical model, in which the spatial representation is fragmented into different regions for storage efficiency and cognitive resources economy purposes. Various authors also started to question the isomorphic and

abstract nature of a spatial representation. Among alternative approaches, it has been described as a cognitive collage (Tversky, 1993). This view emphasizes that mental representations are not necessarily isomorphic, as substantiated by numerous studies showing that metric information is not well preserved in spatial representations (Maddox et al., 2008). In addition, this approach considers a multimodal construction of spatial representations, in contrast with the abstract nature of cognitive maps. Within this framework, body-based information are thus among the ones that can participate in the multimodal integration of spatial representations. It has been studied through the difference between “passive” and “active” learning of spatial material, thus mainly contributing to a first step towards embodiment-inspired views on spatial cognition.

Active learning is often described as the combination of various components involved during the construction of spatial representation, in opposition to passive learning. Active components of spatial learning include decision-making during navigation, allocation of attention during learning, mental manipulation of spatial material, and body-based information (see Chrastil & Warren, 2012, for a review). Body-based information is all motor components of physically walking through an environment (Chrastil & Warren, 2012), among which is *podokinetic information* (Mittelstaedt & Mittelstaedt, 2001). It comprises two types of body-related information: efferent motor actions and proprioceptive feedback about the displacement of body segments and muscle activity. Several studies have shown that being active during spatial learning results in a better performance than the mere observation of a visual description of places, with podokinetic information contributing significantly more than decision making to learning. The availability of podokinetic information during the learning of a new environment helps individuals to retain metric information about distances, angles and landmarks (Waller et al., 2004). Podokinetic information is responsible for biomechanical control of locomotion through leg/feet action with the floors, and bottom-up sensory-motor control of locomotion (Weber et al., 1998). The availability of podokinetic information during learning has been shown to improve survey knowledge, which is a map-like representation of distances and angles between landmarks (Ruddle, Volkova, & Bühlhoff, 2011). All these findings speak in favor of the prominent role of podokinetic information during the construction of spatial representations. However if the link between podokinetic information and spatial processes has been assessed, cognitive mechanisms underlying this relation are yet to be understood. A strong element of understanding of this relation has been

provided by mental imagery studies, from classical mental scanning literature to new embodied insights on motor simulation.

4.2.1.2. *Motor simulation and podokinetic effort*

Motor simulation can be described as a conscious or unconscious process of action simulation, which is “an internal representation of motor programs without overt movement” (Jeannerod, 2001). Mental scanning studies motivated the investigation of motor simulation during spatial processing, because they show that real locomotion and imagined locomotion share similarities. For example, a linear relation between distances on a map and time used for participants to mentally travel these distances has been shown (Kosslyn et al., 1978). Along the same lines, it is known that imagined movements share the same biomechanical constraints as real movements (Jeannerod, 1999) and that motor imagery time is linked to actual movement execution time for simple (Maruff & Velakoulis, 2000) as well as complex movements (Macintyre, 1996). Likewise, strong evidence has even shown that imagined walking speed closely matches actual walking speed (Papaxanthis et al., 2002). However, contradictory results emerged suggesting some discrepancies between imagined and walking time. Kunz, Creem-Reghr and Thompson (2009) failed to replicate the results by Papaxanthis et al. (2002), conversely showing that individuals imagine walking speed faster than their actual walking speed. Decety et al. (1989) showed that wearing a heavy load as a backpack does not decrease actual walking time, but decrease imagined walking time. These results are explained by the existence of a *recalibration* process, as a result of the changing relationship between perceptual and podokinetic information during locomotion (Rieser et al., 1995). Recalibration has an effect on actual walking behavior, and is believed to also affect imagine walking (Kunz, Creem-Regehr, et al., 2009). However recalibration effects on motor simulation are not clearly established and their factors are yet to be explored. One of the variables (other than optic flow) that can force the recalibration of motor simulation is anticipated physical effort, on which we will focus in this work.

Motor-related activity, in most cases can be associated with experiencing physical effort to use podokinetic information during encoding. Physical effort is defined as the recruitment of physical and muscular resources in order to resist an opposing strength. In the example of walking, it lies in the muscular effort deployed towards the ground to lift the body

and move it forward. From an embodied point of view, motor imagery and more especially motor simulation could contribute to constructing spatial representations by including information about walking effort management. Hence, during spatial processing, podokinetic information linked to locomotion might be mentally simulated while retrieving effort-related information, contributing to the encoding and retrieval of metric properties. For example, it has been shown that individuals tend to estimate slopes in front of them as steeper if they wear a heavy backpack (Bhalla & Proffitt, 1999), or overestimate small immediate distances in their field of view (Proffitt et al., 2003). This can be associated with recalibration effects on perception from effort related information. Other work showed that individuals tend to choose preferentially south-oriented paths on a map compared to north-oriented routes (Brunyé, Andonova, et al., 2012). The authors interpreted this as evidence of the existence of an implicit association between North and climbing steeper landforms. Lessard, Linkenauger and Proffitt (2009) also showed that applying additional walking effort to their participants influenced their immediate space perception. Participants wore either loaded ankle weights or non-loaded ankle weights. They were then submitted to an action capability task, where they had to assess whether they would be able to jump a certain gap. Finally, they had to estimate the metric extent of the gap by matching external distant markers with the gap. Results showed a recalibration effect in the fact that wearing ankle weights made participants overestimate distances, but only for jumpable gaps; outside of their action capability range (non-jumpable gaps), no effect of ankle weights was observed.

These experiments suggest that physical effort and possibly motor simulation is involved in our interactions with our immediate environment. They also suggest that the effort component of motor execution can influence our itinerary choices, action capability estimations and short-extent distance estimations by recalibrating perceptions and actions. How individuals use motor simulation for large-scale spatial learning has still to be elucidated. A first attempt has been made in the field of reading comprehension: Brunyé, Mahoney and Taylor (2010) found that route description readers implicitly adjust their reading speed to both metronome and footsteps, whereas readers of survey descriptions adjust their reading speed to metronome sounds only. This can imply that footsteps rhythm influences reading speed only when locomotion is primed by the route perspective text, possibly because first person spatial texts tend to stimulate mental simulation of the motor walking activity. Furthermore, only the sound of running footsteps led route description readers to overestimate distances. Brunyé et al. (2010) suggested that reading a first-person

spatial text involves mentally simulating motor representations of locomotion. To date, only a few studies focused on how podokinetic information linked with physical anticipated effort was used to learn the environment. To date, no other studies linked this influence of anticipated effort on the construction of spatial representation with motor simulation, and less using actual complex spatial tasks. In fact, it is difficult to control parameters of mental imagery, which led authors to only use distance estimation tasks (Decety et al., 1989; Lessard et al., 2009) in a very narrow scale. These perceptual tasks hardly reflect all the complexity of spatial processing in real-life. In this study, we will attempt to test the recalibration of motor simulation caused by additional physical effort applied to podokinetic information during a complex route planning task.

4.2.1.3. Route planning: a complex real-life task in a large-scale environment

Route planning is a spatial problem-solving task in which the objective is to find a path from an origin to a destination. The route planning task implies that origin and destination locations are known, and requires identifying the spatial relation between these two points, comparing different possible options and selecting the most suitable path (Golledge, 1995). As a result, route planning is considered a specific subset of navigation tasks, namely “unaided directed wayfinding tasks” (Wiener et al., 2009). Spatial skills required for route planning are different from spatial tasks presented so far as it involves the use of a large number of cognitive processes such as working memory (De Beni et al., 2005), spatial abilities (Hegarty, Montello, Richardson, Ishikawa, & Lovelace, 2006), executive functions, and also other individual and contextual factors (Grison, Gyselinck, & Burkhardt, 2016). Contrary to distance estimation tasks, it is also much closer to a real-life task that better reflects spatial cognition as a whole with its complexity.

Although no work has directly considered motor simulation during route planning, some studies suggest that spatial problem solving can benefit from podokinetic information: Grant and Magee (1998) for example, found that realistically walking allows participants to find their way faster compared to walking in place (altered podokinetic information). Besides, a large body of literature focuses on the strategies and biases used to plan optimal routes (for a review see MacGregor & Chu, 2011). A large number of planning heuristics have been described, defined as a fast mental process aiming to find solutions minimizing computational cost, without guaranteeing optimality (MacGregor, Chronicle, & Ormerod, 2006). Most of

these studies have dismissed motor influence by using a map-based methodology or abstract material such as points to connect on a map. To our knowledge, only Brunyé et al. (2012) explained planning heuristics by processes related to the embodied cognition framework, claiming that the preference for the south routes on the map is derived from the “north = uphill” implicit association. Going further, planning heuristics might be used to minimize an anticipated navigational effort, as we never plan routes in real situations without the aim of walking the planned path. Consequently, we assume that motor simulation is used during route planning to anticipate navigational effort of possible routes, and that motor simulation implicitly uses parameters derived from podokinetic information to take the physical effort into account through recalibration processes.

Our claim is that using more realistic material such as virtual reality to make individuals effectively learn places and plan routes in a natural way should make it possible to observe a wider variety of functional clues other than computational economy, including walking effort management. This idea draws on a large body of literature dealing with the feeling of presence in virtual reality, showing that individuals tend to feel that they are physically located and interacting with the virtual environment if it is immersive enough, hence implicitly reproducing natural behaviors (Sanchez-vives & Slater, 2005).

4.2.1.4. Aims of the study

The objective of our study was to show that the anticipated walking effort derived from podokinetic information has an impact on the complex process of route planning for navigation. As walking effort perception could play a role in the encoding of metric properties and influence the motor simulation of locomotion, it should also be involved in a complex spatial process such as route planning. This idea implies that motor simulation could be used to mentally travel routes during planning and to evaluate the cognitive and physical cost of each alternative, in order to reduce the anticipated effort. A route planning task using virtual reality was chosen here for its high level of complexity, mixing decision-making with spatial recall, but also for its realistic value.

Our first hypothesis is that increasing walking effort perception should lead participants to implicitly modulate their perception of their own walking speed by recalibrating to a slower speed. This hypothesis deals with recalibration of walking speed (Decety et al., 1989; Kunz, Creem-Regehr, et al., 2009), and tests how additional physical

effort applied to podokinetic information can affect imagined walking speed. We used an implicit measure of perceived walking speed by asking participants to estimate distances and travel times from their route planning phase. This should allow us to get rid of biases such as individual variability of estimations and explicit strategies (oriented responses about speed), but more importantly it would help us to show that effort related recalibration is implicit (unconscious). Moreover, this measure is likely to provide additional information about metric properties of the spatial representation, as slower/higher implicit walking speeds can come from distorted distances.

Our second hypothesis is that individuals tend to mentally simulate their walk during route planning. Modulating walking effort should prompt them to perceive their own walking speed as slower, hence leading them to spend significantly more time planning their route. This would be in favor of an influence of walking effort perception on mental scanning time. Moreover, it would add new elements to route planning heuristics literature: as we evoked before, anticipation of navigational cost through planning heuristics has for the moment only been hypothesized by Brunyé et al. (2012).

A third hypothesis is that individuals tend to simulate their walk during recall of spatial representations. The increase of perceived walking effort (and therefore also decrease in perceived walking speed) should then negatively affect parameters of motor simulation during a spatial recall task, resulting in lower scores at a spatial retrieval task. In order to test this hypothesis, we created a landmark positioning task on a map, where participants are asked to retrieve spatial positions of previously encoded landmarks from their spatial representation. This hypothesis would help us to specify results from active learning literature, showing that not only podokinetic information but more specifically effort perception has an effect on the acquisition of spatial representation.

4.2.2. Méthode

4.2.2.1. *Participants*

50 undergraduate students (36 females and 14 males) were recruited from the Faculty of Psychology of Paris Descartes University for the experiment. Mean age was 23.77 (SD = 5.51). Among these 50 participants, 3 were excluded from the results for not following instructions. All participants were healthy and showed no motion sickness due to the virtual reality material. They received course credit in exchange for their participation.

4.2.2.2. *Material*

Virtual Environments 6 virtual environments were designed for this study, showing fictional urban-like districts (ground surface = 200 × 200 meters). All virtual material was programmed using 3DS Max, Unity and EditoMem software. Each district was designed so as to be visually and structurally unique compared to the others. Each environment contained 4 landmarks, which were very distinctive locations or buildings (e.g. “fountain”, “bus station”). The positions of the landmarks allowed the generation of two different routes per district (*see Figure 19*), for which every possible alternative was similar in terms of distance or travel time (one route = starting from a landmark and going to another landmark). Two types of road were used to create the walkable network for every environment: tarred street and paved walkways. In order to give the environments a realistic appearance, urban elements were placed throughout the streets (e.g. cars, trees, benches, or trash cans). No pedestrians were shown walking the streets, but groups of animated characters were placed at every landmark to increase the saliency of these places compared to regular buildings (*see Figure 19*).

Videos Short videos were created to present the environments for the learning task. These videos were virtual tours of each environment, in which the camera showed every street and crossroad needed to construct a global spatial representation of the district (in the first person view). Videos were made to be presented only once, hence the camera traveled the full network and went back to several streets or intersections to present them from different perspectives. Each video was recorded using FRAPS software and lasted from 2 to 5 minutes. All the landmarks were presented during the videos; the camera stopped in front of them for one second and displayed the exact name in white capital letters associated to the location (e.g. “FOUNTAIN”).



Figure 19 – Left: Schematic map of one of our six environments. Red dots are landmarks. For example, participants had to plan their route from A to B, then C to D. This type of map is used for the landmark positioning task. Right: Example of a landmark in one of our environments.

Landmark Positioning Task A landmark position retrieval task was used to test the quality of spatial retrieval for each district. In this paper-and-pencil task, participants had to place landmarks on a map of the previously learnt district. They were asked to draw a cross at the exact location of each landmark, and to specify the name of this landmark. Participants' answers were compared to a reference map. Answers were considered correct if they deviated less than one centimeter away from the limits of the actual landmark. The maps used for this task were similar to the map shown in *Figure 19*, with the road network (dimensions = 10 × 10 cm).

Ankle Weights In this study, we used ankle weights to calibrate participants' walking effort perception. These weights were loaded belts attached to the participants' ankles. Note that two conditions were created according to ankle belts: loaded and non-loaded. For the non-loaded condition, participants only wore ankle belts without the loads in them. As used in previous studies (Lessard et al., 2009), we adapted the ankle loads to the participant's weight: they weighed around 5% of the total participant mass, equally divided between the two ankles (e.g. for a subject weighing 80 kg, each ankle belt weighed 2 kilos, for a 60 kg subject, each ankle belt weighed 1.5 kilograms). Ankle weights, specifically target effort perception through podokinetic information: they are meant here to increase physical resources to spend for efferent motor actions, while increasing proprioceptive feedback of legs moving effort.

Questionnaires

In addition to standard demographic information, two questionnaires were used for this study. The first one aimed to assess spatial tasks usually performed by the participant in his daily life, as well as sport habits and frequency. All 16 items were created for the present study; 11 of them consisted of 4-point scales (zero being “not at all” and four: “every time” or “absolutely”), and the rest were open questions.

The second questionnaire was the questionnaire on spatial representations (QSR, Pazzaglia et al., 2000). It is composed of 11 items on a 5 point scales (except for 3 items that includes only three alternatives) and permits different scores dealing with specific spatial abilities to be recorded: spatial global abilities (general auto estimated sense of direction), preference for survey perspective (allocentric map-like representation of the space), preference for route perspective (egocentric view from first person perspective), knowledge and use of cardinal points, indoor and outdoor ease to orient and landmark-centered strategy preference. In our study, we only used spatial global abilities to obtain a robust sense of direction score for each participant. This scale is ranged from 7 (lowest) to 33 (highest). In our sample, mean score was 19 (SD = 5.38). Minimum observed score was 8, maximum observed score was 29. For psychometrics characteristics of the Questionnaire, see Pazzaglia et al. (2000).

4.2.2.3. Procedure

Each participant was tested individually for one hour and a half. Participants were first asked to communicate their height, weight and age. After they had been equipped with ankle belts (weighted or not depending on the condition), they were asked to walk down the laboratory corridor. They were informed that the experiment would deal with walking behaviors in urban environments, and that they would have to wear “sensors”, which justified wearing ankle belts. They thus had to perform two laps of a simple square shaped circuit (total approximate distance = 150 meters) before returning to the experiment room. To do so, they were instructed to walk naturally, with their usual speed and normal gait. This walking phase was called the “calibration phase”, as it was used to influence walking effort perception for the weighted group. It was repeated three times during the whole experiment and participants had to report their level of perceived fatigue on a 5-point scale after each walking phase. The duration of the calibration phases were timed by the experimenter. After calibration, participants were installed in front of a large screen (55-inch plasma television). They had to stand still in front of a desk throughout the whole experiment, but could place

their hands or lean on the desk. Each trial was then composed as follows: 1) video learning of an environment; 2) first route planning; 3) first route time and distance estimates; 4) second route planning; 5) second route time and distance estimates; 6) landmark positioning task. This procedure was repeated 6 times (once per environment). The environments were presented in random order. After having completed this procedure for an environment, participants were told that they could forget the previous video, as they would never go back on it.

During video learning, participants were instructed to pay attention to spatial cues and global environment structure. They were informed that they would have subsequently to plan routes between landmarks. Each video was presented only once. Then, two landmarks were presented (starting point and goal, e.g. “Bus station → Embassy”), and participants had to mentally plan the route they would take to walk from point A to B. No time limit was imposed; the instruction was to stop planning only when they felt that they could perform the route without hesitating or making errors. When they had completed the planning phase, they pressed a key on the computer keyboard, which stopped planning time recording. After each planning task, the participant was free to navigate in the environment using a joystick to test his previously planned route. This route planning test phase was used to check if route planning has been correctly performed. The experimenter then asked the participants to estimate how long it would take them to perform their planned route (time estimate) and how many meters they would walk (distance estimate). They had to plan two routes per environment, as there were 4 landmarks for each environment, and the routes connected pairs of landmarks. The starting points of routes were randomized across participants. Once this procedure had been repeated for each environment, participants had to fill in questionnaires. They were then informed about the goals of the study. As the experiment was long and possibly tiring for them, they had the opportunity to take a 10-minute break after 3 environments. See *figure 20* for a schematic representation of the procedure.

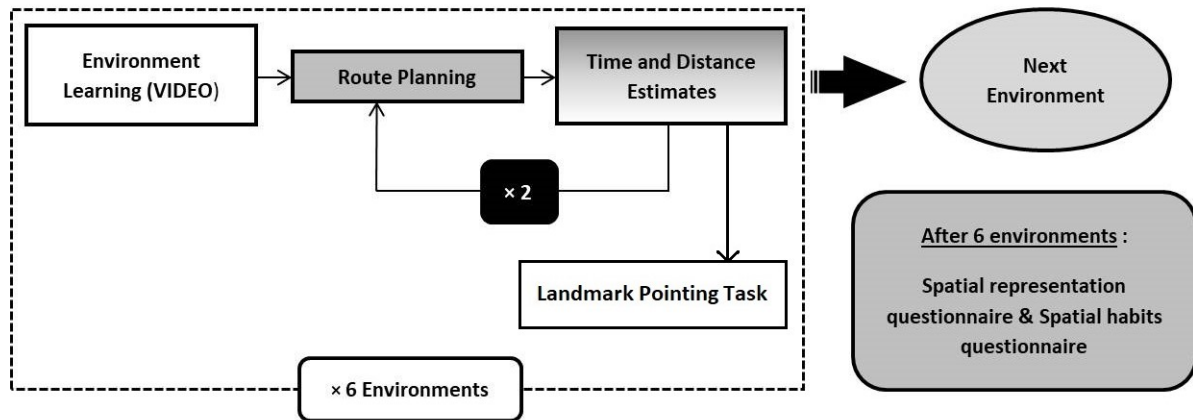


Figure 20 - Schematic view of the procedure

4.2.3. Résultats

All analyses were performed using R software 3.4.0 (R Development Core Team, 2017). In order to confront our hypotheses, we examined the effect of ankle weights on three different measures: implicit walking speed, route planning time and landmark positioning performance. To calculate implicit walking speed, we used the ratio between estimated time and distance, in meters/minute. It is important to note that this measure is implicit in the sense that participants were never asked to estimate their own walking speed. All measures were tested with multiple linear regression models, using weighting condition (loaded vs non-loaded ankle weights) as a first categorical predictor and auto-estimation of global spatial abilities as a continuous predictor. It is known that general sense of direction or spatial abilities can predict the quality of visual learning in a novel environment (Hegarty et al., 2006), leading us to include this variable as a predictor in our models in order to control individual differences in the quality of spatial learning. All models were tested for outliers (influential observations) using Cook's distance (Cook & Weisberg, 1982): for each measure, participants deviating for more than 1 unit in this indicator were excluded from the model, leading to differences among degrees of freedom between measures. All regression models have been tested with analysis of variance (ANOVA) in order to assess or reject interaction effects between our predictors.

Group Matching Group means for additional variables are summarized in Table 1 (Loaded group = 24 participants, Non-Loaded group = 23 participants). Participants were equally distributed among groups regarding height ($M_{\text{loaded}} = 1.69$ m, $SD = .07$; $M_{\text{non-loaded}} = 1.67$ m, $SD = .08$; $t(45) = .81$, $p = .42$) and weight ($M_{\text{loaded}} = 62.58$ kg, $SD = 7.82$; $M_{\text{non-loaded}} =$

67.48 kg, $SD = 13.36$; $t(45) = -1.19$, $p = .24$). Furthermore, the t-tests revealed no significant difference regarding fatigue estimations (on a scale from zero to four) at the end of the study between the loaded group ($M_{\text{loaded}} = 2.17$; $SD = .68$) and the non-loaded group ($M_{\text{non-loaded}} = 2.65$; $SD = .82$; $t(45) = -1.80$, $p = .08$). As participants were randomly assigned to the loaded and non-loaded group, we made sure that our two conditions were similar in terms of various parameters using t tests. Thus, each group was used to an equal mean walking time a day ($M_{\text{loaded}} = 70.31$ min, $SD = 40.23$; $M_{\text{non-loaded}} = 69.89$ min, $SD = 43.99$; $t(45) = .026$, $p = .98$), and hours of sports activities a week ($M_{\text{loaded}} = 1.49$ hours, $SD = 2.11$; $M_{\text{non-loaded}} = 1.28$ hours; $SD = 1.47$; $t(45) = .32$, $p = .75$). All participants were equally accustomed to using a GPS device ($t(45) = .72$, $p = .48$) or a route planning helper application ($t(45) = -0.15$, $p = .88$). They were also equally used to learning new places and routes in their everyday life ($t(45) = -0.55$, $p = .58$), with the same level of perceived difficulty ($t(45) = -0.31$, $p = .76$). Lastly, all groups estimated equally the cognitive cost of the experiment on a scale from zero to four ($M_{\text{loaded}} = 1.62$, $SD = .70$; $M_{\text{non-loaded}} = 1.54$, $SD = .69$; $t(45) = .34$, $p = .73$), as well as global physical cost ($M_{\text{loaded}} = .50$, $SD = .63$; $M_{\text{non-loaded}} = .52$, $SD = .68$; $t(45) = -0.09$, $p = .92$), and were equally satisfied about their own performances ($M_{\text{loaded}} = 1.75$, $SD = .58$; $M_{\text{non-loaded}} = 1.87$, $SD = .56$; $t(45) = -0.51$, $p = .61$).

Subjective Speed

Participants showed a very broad range of variability in their distance and time estimates (presumably because each individual tends to use a different internal scale for subjective distances and times), hence we calculated the ratio between distance and time estimates to standardize them on the same scale. This method provided a standard indicator which stands for an implicit measure of subjective speed (meters/min). Ankle weights showed a significant effect on subjective walking speed ($t_{(34)} = -2.13$, $p = .04$), meaning that participants who wore loaded ankle belts estimated slower implicit walking speed ($\bar{M}_{\text{loaded}} = 68.94$ meters/min) compared to participants who wore non-loaded ankle weights ($\bar{M}_{\text{non-loaded}} = 91.04$ meters/min, *see Figure 21*). It is interesting to note that loaded participants did not walk significantly more slowly in the actual walking phases around our laboratory (calibration phases) than non-loaded participants. ($\bar{M}_{\text{loaded}} = 53.88$ seconds; $\bar{M}_{\text{non-loaded}} = 52.67$ seconds, $t_{(45)} = .65$, $p = .52$). Spatial global abilities had no effect on subjective

speed ($t_{(34)} = -0.64, p=.52$), and did not interact with ankle weights ($F_{(1, 34)} = 0.57, p=.79$).

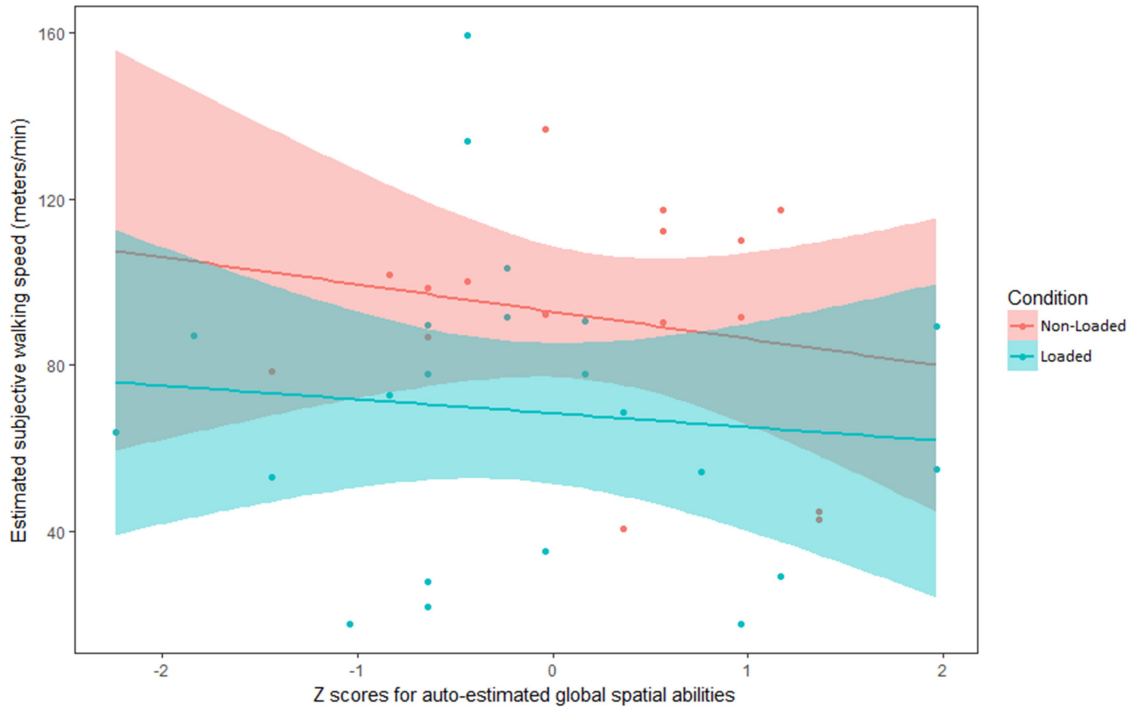


Figure 21 - Effect of ankle weights on mean subjective walking speed (meters/min), obtained through calculating the ratio between estimated distance and time for each route, with fitted linear adjustments and 95 confidence intervals

Planning Times Mean planning time over all participants was 21.2 seconds (SD = 7.4 sec). There was no significant effect of ankle weights on route planning times ($t_{(40)} = 0.79, p=.44$); loaded group did not differ from non-loaded group for this measure ($\bar{M}_{\text{loaded}} = 18.92$ sec; $\bar{M}_{\text{non-loaded}} = 18.20$ sec). Interestingly, spatial global abilities also failed as a significant predictor of route planning times ($t_{(40)} = -0.22, p=.82$). Analysis of variance showed no significant interaction between ankle weights and spatial global abilities ($F_{(1, 40)} = 1.56, p=.22$). However, a trending coefficient was found in the linear regression model, by breaking down the effect of spatial global abilities on each weighting groups, suggesting that spatial global abilities could be useful to predict route planning times only for the loaded group, but not for the non-loaded group ($t_{(40)} = -1.75, p=.08$, see Figure 22). This trend suggests that the ankle weight effect (higher route planning times for loaded participants) could only appear for loaded-low-spatial-abilities participants: the lower the spatial abilities, the higher the route planning times for loaded group. On the other hand, non-loaded group

planning times seem to remain stable along the spatial global abilities scale, showing no effect of this predictor.

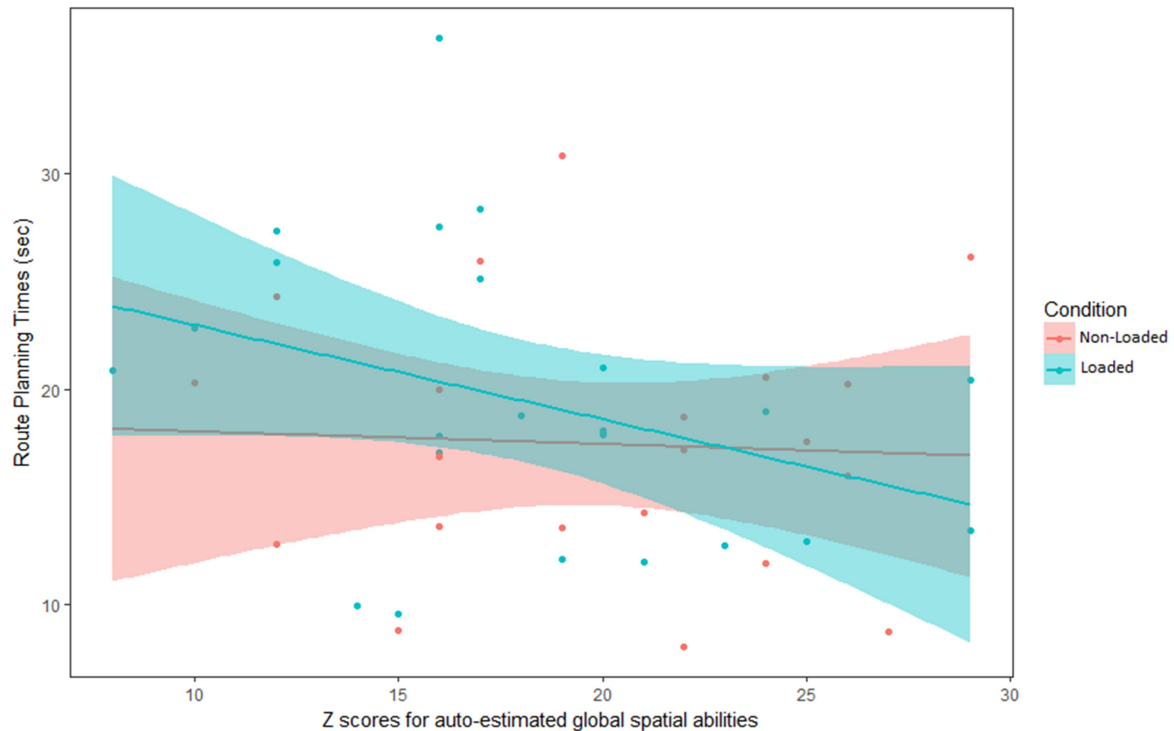


Figure 22 - Mean planning time (sec) as a function of ankle weights and global spatial abilities, with fitted linear adjustments and 95 confident intervals.

Landmark Positioning Task A significant ankle weight effect was found on performance at the landmark positioning task ($t_{(38)} = -3.31, p < .01$). Loaded participants experienced more difficulties than non-loaded participants to recall spatial positions of landmarks on maps ($\bar{M}_{\text{loaded}} = 68.36\%$; $\bar{M}_{\text{non-loaded}} = 82.71\%$). A significant effect of spatial global abilities was also found ($t_{(38)} = 4.03, p < .001$): the higher the spatial global abilities, the higher the landmark positioning score. No interaction effect was found between ankle weight effect and spatial global abilities effect ($F_{(1, 38)} = 0.11, p = .74$, see Figure 23).

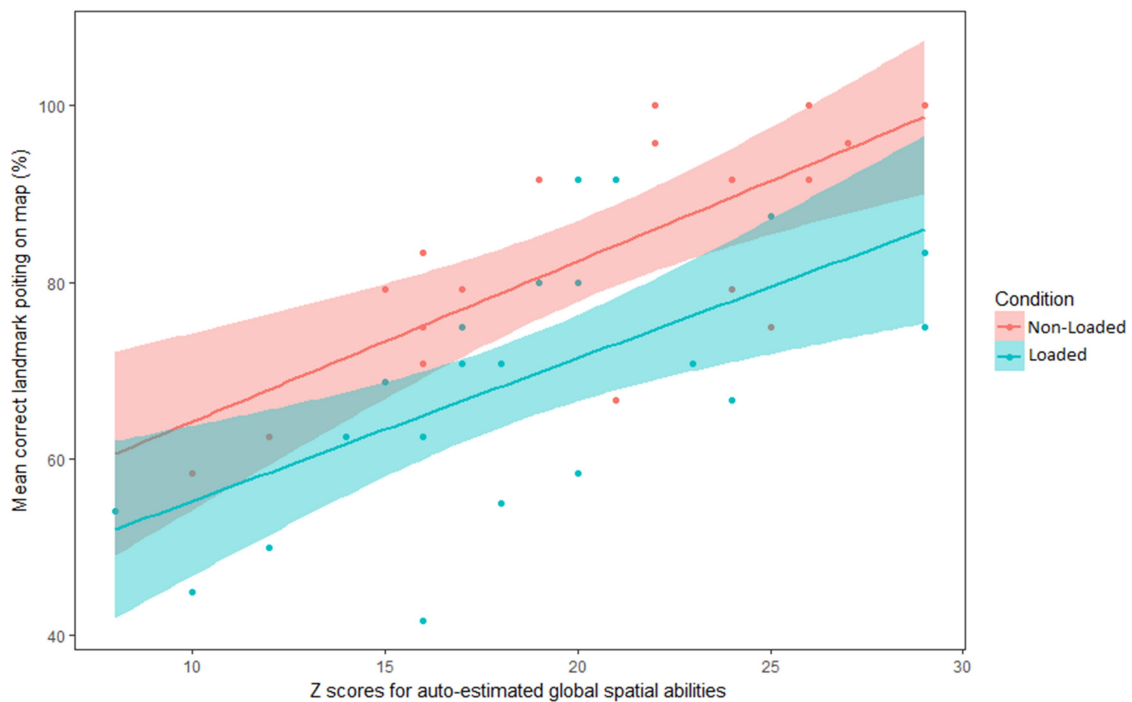


Figure 23 - Mean landmark position retrieval task performance as a function of ankle weights and global spatial abilities with fitted linear adjustments and 95 confidence intervals.

4.2.4. Discussion

This study aimed at demonstrating the influence of walking effort perception on motor simulation during route planning. The general idea of this study was that motor simulation is used during route planning to anticipate navigational effort of possible routes, implicitly using parameters derived from podokinetic information to take the physical effort into account through recalibration processes. We asked our participants to walk with or without ankle weights, prior to learning virtual environments. They then had to plan routes in these environments, while planning time was measured. Estimates of perceived walking time and distances were recorded to obtain an implicit measure of subjectively estimated walking speed. Subjective walking speed was significantly lower when wearing ankle weights, without inducing a significant effect on planning times. Ankle weights had also a clear effect on spatial performance, negatively affecting landmark positioning on a map.

The first result of this study shows that wearing ankle weights modulates walking speed perception, thus showing that podokinetic effort can lead to recalibration of imagined walking speed. The ratios between estimated times and distances for weighted participants were significantly lower than for non-weighted participants. This reflects a recalibration of the

inner perception of walking speed. Whereas participants were not aware of estimating their own walking speed through time and distance estimations, the size of the estimated walking speed difference between our two conditions was quite high (17 meters/min). According to Bohannon and Andrews (2011) in their meta-analysis, a normal “comfortable” walking speed is around 80.4 meters/min for young female adults and 81 meters/min for young male adults (age from 20 to 29). In our study, actual walking speed was around 78 meters/min for the loaded group, and 80 meters/min for the non-loaded group, which seems fairly representative of the population (considering that 72% of our participants were young female adults). However, we can note that non-loaded participants showed a tendency to overestimate their own walking speed (Non-Loaded subjective speed = 97 meters/min; $\bar{M}_{\text{non-loaded}}$ Loaded subjective speed = 80 meters/min). This is in line with the findings of early studies, which showed that self-motion speed is commonly misperceived in the absence of non-visual sensory clues (L. Evans, 1970), and that optic flow is perceived as “too slow” (Thurrell, Pelah, & Distler, 1998). Kunz, Creem-Reghr and Thompson (2009) showed that imagined walking speed could be recalibrated such as actual walking speed. Using virtual reality, Banton, Stefanucci, Durgin, Fass and Proffitt (2005) asked their participants to match their own walking speed on a treadmill with the correct speed of optic flow derived from the movement of an avatar. Again, participants significantly overestimated their own walking speed, by matching a normal walking speed (80 meters/min) with a faster optic flow of 123 meters/min. Thus, comparing estimated walking speed in virtual reality to actual walking speed has been proven misleading, by virtue of this common effect of misperception, and our results are in line with these works. In this study, we add that recalibration can occur not only in reaction to optic flow changes, but also in reaction to physical podokinetic effort. Observing the difference between estimated imagined speeds allowed us to observe a significant effect of ankle weights over walking speed estimation without any actual speed difference between loaded and non-loaded groups: imagined walking speed could be related to the self-perception of walking speed (linked with anticipated effort) instead of absolute actual walking speed (as stated by Decety et al., 1989). This confirms our first hypothesis, and replicates on a larger scale the results reported by Lessard et al. (2009), showing that increasing walking effort leads to a decrease of action capability perception, here even in a more complex and realistic task than distance estimation.

The second result of this study deals with the hypothesis of motor simulation during route planning. This hypothesis was that participants who would perceive their own walking

speed as slower (because ankle weights increased their walking effort), would then spend more time planning routes. This hypothesis was based on mental scanning studies, showing that imagined walking speed is closely related to actual walking speed (Papaxanthis et al., 2002), and that a linear relation exists between mental travel time and the actual distance to be traveled (Kosslyn et al., 1978). While this hypothesis was not directly confirmed by our results, an interesting pattern was found in favor of it. Although no interaction effect was found between ankle weights and auto-estimated spatial abilities, post hoc analysis showed a trend, suggesting that loaded ankle weight could affect only low spatial ability participants. That is to say, only low spatial abilities participants showed an effect on ankle weight on route planning times, with an increase of this measure compared to non-loaded group. High spatial ability participants did not show any effect of ankle weights on route planning times. Consequently, non-loaded group planning times were not dependent of spatial global abilities, whereas route planning times increased as spatial global abilities decreased for loaded participants. This trend could suggest that low spatial abilities participants are more dependent of podokinetic information and motor simulation during route planning than high spatial abilities participants. This is to be addressed in future studies. Interestingly, it has been stated by Hommel (Hommel, 2017) that during a complex task, top-down mechanisms linked with cognitive control can increase the importance of features dealing with the actual experience of the subject within the task. This hypothesis, named *intentional weighting theory*, can help to explain our results, as according to Hommel, the more the task is cognitively demanding, the more it would involve the reactivation of podokinetic information to solve it. Here, one would expect that complex route planning task is more difficult for lower spatial abilities participants, than for higher spatial abilities participants: which would hint on why lower spatial abilities participants seem to allocate more importance for podokinetic information to help solving this task. This hypothesis is very promising and has to be studied in future works, notably by manipulating cognitive demand/difficulty of the route planning task to observe how it would influence the use of podokinetic information and motor simulation.

The third key result is linked with the hypothesis of an effect of additional walking effort on the retrieval of spatial representations. Our results showed that spatial abilities were strongly linked with spatial performance; mean correct scores being higher as spatial abilities increase. More importantly, our results showed a significant ankle weight effect on landmark positioning task: weighted participants experienced more difficulties at retrieving spatial

positions on a map than non-weighted participants (Loaded group = 68.36%; Non-loaded = 82.71%). This is a key result as it can lead us to think that motor simulation is used during the recall of spatial representation, even if the task does not imply to mentally travel a route. Hence, disturbing podokinetic information by applying additional physical effort would prevent participants from simulating distances and routes between landmarks. This could suggest that active learning positive effect (Chrastil & Warren, 2012) for the recall of spatial material is partially subtended by motor simulation of podokinetic information. Additionally, we found an ankle weight effect on a mainly allocentric task, suggesting that in addition to what was stated in previous works (Brunyé, Mahoney, & Taylor, 2010), motor simulation and podokinetic information could be used for both perspective (egocentric and allocentric). In future works, it would be crucial to observe the influence of podokinetic information manipulation in different perspective-dependent task, in order to disambiguate this particular question. It is interesting to note here that landmark positioning task wasn't showing a similar trend to route planning task (increase of ankle weight effect for lower spatial abilities scores), suggesting that landmark positioning task is overall less cognitively demanding compared to route planning (Hommel, 2017). Lastly, we used time and distance estimates to create an implicit measure of walking speed perception. From a theoretical view, the modulation of this ratio between time and distance estimations can be seen as a novel element supporting non isomorphic spatial representation theories, such as cognitive collages (Tversky, 1993). However, the huge individual variability between distance estimations did not enable us to include it as a dependent measure in the analyses, and we were therefore unable to conclude that increasing walking effort alters the metric properties of spatial representations. The multimodal nature of spatial representations is also newly assessed by the fact that ankle weights distorted the ratio between distance and time estimations, suggesting that recalibration of podokinetic information had not only an influence on walking speed estimation, but also on the relation between metric and time-based properties of the spatial representation. However, to conclude about the role of podokinetic information in spatial representations, further investigating is needed, notably by contrasting the effect of podokinetic information during the acquisition of the representation (encoding phase) and during the task-driven manipulation of the representation (retrieval phase). Furthermore, it would be crucial for future works to use active learning methodologies (walking on a treadmill for example) instead of passive encoding of videos, as active learning has already been proved to help the construction of spatial representations (Chrastil & Warren, 2012).

The three main results of this article open a wide range of questions to be tested. Firstly, it could be raised that the increase of physical effort leading to a recalibration of motor simulation can involve an increase in task demands. Moreover, route planning tasks are complex mental activities involving numerous cognitive processes (Golledge, 1995). Considering the limited cognitive resources available, a large body of literature has described the use of planning heuristics to reduce cognitive cost during route planning (MacGregor et al., 2006). It is possible that planning heuristics applied to spatial material also aim to reduce the anticipated physical cost, in addition to cognitive cost. This may also explain why high spatial abilities participants did not show any ankle weight effect; their general ease in performing spatial tasks could be linked with the automation of route planning processes, allowing them to spend fewer cognitive resources, therefore not requiring the use of heuristics. Although our results cannot confirm that walking effort perception had an effect on the use of heuristics for low spatial ability participants, they raise new questions about route planning processes and initiate embodied considerations about physical cost minimization in route planning heuristics. Hence, we suggest that the route planning literature could benefit from an embodied view of spatial cognition (see also Dutriaux & Gyselinck, 2016).

A second consideration to address here is related to perspective used during route planning solving. Indeed, it has been shown that podokinetic information is primarily used during motor simulation from an egocentric perspective (Brunyé et al., 2010), and route planning is a typical egocentric centered task. Recent work has shown that global sense of direction and spatial abilities are strongly correlated with perspective taking (Hegarty et al., 2006). Furthermore, it has been recently shown that a high score on the global spatial ability scale QSR was strongly related to a preference for a survey perspective. Hence, the better individuals perform in spatial tasks, the higher their preference for the survey perspective (Pazzaglia & Meneghetti, 2017). Considering that the route perspective involves motor simulation (Brunyé et al., 2010) but not necessarily the survey perspective, this suggests that high spatial ability participants would not have to use motor simulation to complete the task. However, we found in this work clues of motor simulation during a mainly allocentric task, which raises questions. This point, in line with the general question of perspective preferences, is to be studied in future work.

Lastly, we found that spatial performance was affected by an increase of physical effort. This could be interpreted as a motor interference effect over long-term memory

retrieval. This kind of effects have been demonstrated previously: we know for example that the retrieval of action-related stimuli is potentiated by the use of compatible motor response (Tucker & Ellis, 1998). Furthermore, incompatible posture for action driven movement interferes with long-term memory retrieval of manipulable objects (Dutriaux & Gyselinck, 2016). This could lead us to think that retrieving a spatial representation is an action-directed process involving the activity of physically walking in the environment. Therefore, interfering with podokinetic information would decrease the ease to retrieve spatial long-term memories. Motor interference or action compatibility effects have already been interpreted as a hint of motor simulation (Glenberg & Kaschak, 2002), which lead us to think that these effects further need to specifically be investigated within the spatial cognition framework.

To conclude, the novel finding of the present study is that increasing walking effort can influence walking speed perception independently of actual walking speed, affecting performances on spatial task. Interesting results have been found concerning recalibration of the use of podokinetic information on a complex route planning task, but further investigation is needed. These results are in line with the hypothesis of motor simulation during complex spatial processes, but also generally point towards an embodied view of spatial cognition, emphasizing the role of anticipated effort on the learning and the processing of novel environments. This work has well-fitted for applied widening, as it can provide insights in various domains such as development of route planning applications for pedestrians for example.

4.3. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

- **Porter des poids supplémentaires aux chevilles conduit les participants à sous-estimer leur vitesse de marche, en l'absence de différence réelle.** Cette sous-estimation est subjective, elle ne concerne que la perception que les individus ont de leur propre vitesse de marche. Elle est également probablement implicite, puisque les individus n'étaient pas conscients d'estimer leur propre vitesse en répondant à des tâches d'estimation de distances et de temps. Ce résultat est important car il confirme les observations précédentes ayant montré que le recalibrage de l'effort physique associé à la locomotion n'affecte que la vitesse de marche imaginée et non la vitesse de marche réelle (Decety et al., 1989). De plus, le recalibrage observé semble suggérer que les participants ont intégré dans leur représentation spatiale des informations de distances, de temps, mais également d'effort de locomotion. Malgré l'absence de différence réelle de vitesse de locomotion, ils semblent avoir recalculé leur propre vitesse afin de rééquilibrer le ratio énergie/distance (White et al., 2013) et corriger la transgression des attentes proprioceptives (Friston, 2012). Cette piste sera spécialement explorée lors de la prochaine étude (étude 3).
- **Nous ne sommes pas en mesure d'attester que la diminution de vitesse subjective ralentit le temps d'exécution de la tâche de planification d'itinéraire.** Cependant, nous observons seulement une tendance concernant l'effet d'interaction entre le port de poids aux chevilles et les capacités spatiales globales auto-estimées. Cela suggère que les participants s'estimant faiblement compétents dans le traitement de l'information spatiale auraient plus tendance à ralentir leurs temps de planification lorsqu'ils sont lestés, que ceux s'estimant compétents. La simulation sensorimotrice pourrait être toujours utilisée par les participants qui ne sont pas capables d'opérer un changement de perspective, en dépit de l'effort moteur artificiellement modifié. En effet, il a été montré que la perspective égocentrée favorisait la simulation sensorimotrice (Brunyé, Mahoney, & Taylor, 2010), mais que les participants disposant de capacités spatiales élevées étaient plus à même de manipuler l'information spatiale sous un format allocentré (Pazzaglia & Meneghetti, 2017). De manière générale, nos résultats suggèrent que l'utilisation de la simulation sensorimotrice lors de la planification d'itinéraires est sensible à la variabilité interindividuelle.

Le recalibrage de l'effort de marche par le port de poids lestés aux chevilles affecte les performances lors du rappel de positions spatiales sur carte. Ce résultat est central dans l'argumentaire de cette thèse : si le fait de subir un effort physique plus important que la normale lors de la locomotion affecte les performances de rappel spatial, alors il est possible que la dépense énergétique soit intégrée dans la représentation spatiale (à travers des biais métriques notamment). Ainsi si la dépense énergétique semble moduler la perception (Proffitt, 2006), elle aurait également des conséquences en mémoire. La locomotion ne serait plus seulement un facteur favorisant la construction de la représentation (p. ex. étude 1), elle pourrait également en distordre les propriétés. Ainsi seule la disponibilité d'informations podokinétiques « naturelles » (non recalibrées) pourrait participer aux effets facilitateurs d'apprentissage actif précédemment décrits. De plus, nous avons ici observé cet effet lors de la réalisation d'une tâche en perspective survol, en dépit de travaux précédents suggérant que la simulation sensorimotrice de la locomotion n'était utilisée que pour le traitement de l'information spatiale selon une perspective route (Brunyé, Mahoney, & Taylor, 2010). Ceci confirme donc l'idée que l'information podokinétique (à travers la simulation ou non) peut également participer à la connaissance spatiale sous un format survol (Ruddle, Volkova, & Bühlhoff, 2011). Ce résultat nécessite cependant d'être approfondi : l'approche « action-specific » de Proffitt postule notamment que les conséquences d'un effort physique de locomotion plus important concerne la surestimation de distances perçues. Il nous faudrait donc observer ce type de biais en mémoire pour s'assurer de la multimodalité des représentations spatiales. Or, cette étude n'explore pas les effets du recalibrage sur les propriétés métriques, mais seulement sur les performances de rappel. Nous pouvons raisonnablement imaginer que la baisse des performances de rappel est liée à des distorsions métriques en mémoire, mais nous ne disposons pas de mesures observées pour l'affirmer à partir de cette étude. De plus, il est possible de reprocher à cette étude de ne pas placer les participants dans une situation suffisamment écologique, à cause de l'ajout de poids aux chevilles et d'une situation d'apprentissage passive. Une investigation plus approfondie des conditions de transgression de la boucle perception action (Coello & Delevoeye-Turrell, 2007) semble nécessaire, afin de mieux comprendre comment les informations sensorimotrices sont intégrées à la représentation lors de l'encodage. L'étude 3 aura pour objectif de répliquer l'effet du recalibrage de l'effort physique dans une condition active et écologique.

5. ETUDE 3 : EFFET D'UN BIAIS D'ANTICIPATION D'EFFORT PHYSIQUE DE LA LOCOMOTION SUR LES PROPRIETES METRIQUES DE LA REPRESENTATION SPATIALE

5.1. OBJECTIFS

Les études précédentes ont montré que la disponibilité des informations podokinétiques lors de l'apprentissage spatial influençait les performances lors du rappel de la représentation spatiale. En effet, marcher durant l'apprentissage améliore les performances de rappel de positions spatiales (étude 1), mais recalibrer l'effort physique de marche par le port de poids lestés aux chevilles altère ce processus de récupération de l'information spatiale (étude 2). L'effet de recalibrage sur les performances de rappel observé lors de l'étude 2 suggère donc que le coût énergétique impliqué lors de la locomotion influence les paramètres de la représentation spatiale. Cette idée est cohérente avec l'approche *action-specific* (Proffitt, 2006), qui postule que les coûts énergétiques impliqués par l'environnement font varier la perception de celui-ci, et peut être rapprochée des travaux sur le distance-on-hill effect évoqués précédemment. Cependant, ces travaux comme ceux de notre étude 2 utilisent un protocole paradoxalement peu adapté au développement d'une approche écologique de la cognition spatiale, puisqu'ils impliquent de présenter de l'information spatiale à des observateurs statiques. Or, si la perception ou la mémoire de l'espace est dirigée vers l'action, il est primordial d'observer comment les potentiels d'action offerts par l'environnement influencent le traitement de l'information spatiale dans le cadre de la locomotion active.

Dans cette optique, la prochaine étude observera comment les pentes montantes influencent la perception des distances, cette fois-ci durant la navigation active. Notre objectif sera de montrer comment le coût énergétique visuellement suggéré par la pente montante durant l'apprentissage d'un lieu peut moduler les propriétés métriques de la représentation spatiale. Pour ce faire, nous proposons d'utiliser la réalité virtuelle afin d'isoler l'effet de la composante visuelle implicite (perception de l'inclinaison du terrain) en maintenant constant l'effort physique développé lors de la marche pour des inclinaisons montantes ou descendantes. De cette manière, nous espérons tester le postulat de Proffitt (2006) dans une situation d'apprentissage actif complexe et à grande-échelle (Chrastil & Warren, 2012) : la perception visuelle de pente montante activerait automatiquement des représentations

sensorimotrices liées à la locomotion avec coût énergétique non optimal. Alors que cette « affordance » (Gibson, 1979) de la locomotion serait liée à des mécanismes d'évitement menant à la surestimation des distances en pente (Stefanucci et al., 2005), nous postulons toutefois que l'inactivité physique des précédents protocoles aurait pu favoriser une certaine direction du distance-on-hill effect. Cette direction pourrait dépendre des demandes spécifiques de la tâche en cours de réalisation, mais ne serait pas forcément généralisable à d'autres tâches. Par exemple, les demandes de la tâche favorisent-elles le distance-on-hill effect lorsque le participant n'est plus en position d'estimation passive mais d'apprentissage actif ? En effet, nous proposons que la simple disponibilité de l'information podokinétique durant l'exécution du mouvement de marche devrait moduler l'estimation et la mémorisation des distances montantes par un processus de synthèse des informations visuelles et proprioceptives.

Si l'ajustement est rendu possible par la disponibilité des informations podokinétiques lors de l'apprentissage actif, la surestimation des distances en pentes montantes devrait disparaître. Si cette hypothèse s'avère correcte, il devrait être possible d'inverser la direction du distance-on-hill effect en transgressant la pertinence des informations podokinétiques (par exemple, lorsque l'effort physique impliqué lors de l'ascension de pentes est moins important que l'effort anticipé visuellement). Cette inversion est prévue par les théories du *predictive coding* (Friston, 2005) : si la perception est un processus de vérification d'hypothèses (Rao & Ballard, 1999) et que l'effort développé à monter une pente est moins important que celui attendu selon les *priors* (Friston, 2005) de l'individu, alors un mécanisme de compensation des distances perçues lors de l'apprentissage devrait se mettre en place afin de corriger l'erreur de prédiction proprioceptive (Friston, 2012). Cette compensation devrait alors aller dans le sens de la diminution de l'ampleur des distances perçues (afin d'équilibrer le ratio entre distance parcourue et coût énergétique développé, voir White et al., 2013). Or, si la perception des distances en mouvement est rendue plus précise grâce à l'intégration des informations podokinétique (tel que mentionné plus haut), cette compensation devrait intervenir sur des distances relativement proches des distances physiques réelles, conduisant alors à une sous-estimation des distances en pente. Ce type de résultat devrait constituer un argument en faveur de la nature multimodale des représentations spatiales (p. ex. Tversky, 1993, 2003) si l'effet attendu persiste en mémoire. De plus, ce type de protocole permettrait d'asseoir l'idée selon laquelle les propriétés métriques de la représentation sont construites lors de l'encodage à partir de l'information visuelle, mais en interaction avec les informations

Etude 3 : effet d'un biais d'anticipation d'effort physique de la locomotion sur les propriétés métriques de la représentation spatiale

podokinétiques, visuellement et implicitement suggérées (selon les approches écologiques de la vision), ou physiquement expérimentées par la locomotion.

5.2. ARTICLE 3

“Run to the hills”: Specific contributions of anticipated energy expenditure during active spatial learning

Simon Lhuillier^a, Valérie Gyselinck^b, Pascale Piolino^a, & Serge Nicolas^a .

^a *Université de Paris, Laboratoire Mémoire, Cerveau et Cognition, Paris, France*

^b *Université de Paris, Laboratoire de Psychologie et Ergonomie Appliquées, IFSTTAR, Versailles, France*

ABSTRACT

Grounded views of spatial cognition consider that space perception is shaped by the body and its potential for action, therefore leading to the construction of multimodal, non-isomorphic and dynamic spatial representations. These views are substantiated by empirical observations of action-specific effects such as the distance-on-hill effect, which states that uphill distances are overestimated because of the integration of energy expenditure cues during spatial perception. However we hypothesize that this effect is an oversimplification of the complex contributions of body-related information to spatial processing. The goal of this study is to isolate the effect of visual anticipated energy expenditure clues such as slanted slopes on the construction of spatial representations in memory, during active spatial learning. Using highly immersive virtual reality and an omnidirectional treadmill, we investigated the effect of anticipated implicit physical locomotion cost by comparing spatial learning for uphill and downhill routes, while maintaining actual physical cost and walking speed constant. In a first experiment, we participants learnt novel places from exploring uphill or downhill routes. Their spatial knowledge was then tested using a landmark positioning task on a map. In a second experiment, the same protocol was used with participants who wore loaded ankle weights. Results from the first experiment showed that walking uphill routes without additional walking effort lead to a global underestimation of distances for uphill routes compared to downhill routes. This inverted distance-of-hill effect was not observed in experiment two, due to the additional walking effort applied to locomotion. These results suggest that distances underestimation observed in experiment one emerged from recalibration processes aiming to solve the transgression of proprioceptive predictions linked with uphill energy expenditure: wearing loaded ankle weights during uphill walking led to a vanishing of this recalibration process. No classical distance-on-hill effect was observed in experiment two, either suggesting that this effect only occur during perception and not from memory, or that it only occurs during passive observation and not active locomotion. Results are discussed in relation with ecological grounded frameworks of spatial cognition and predictive coding theories, emphasizing on the importance of empirical task-specific features for the understanding of multimodal contributions to spatial learning.

KEYWORDS: *distance-on-hill, spatial learning, locomotion physical cost*

5.3. EXPERIENCE 1 : INVERSION DU DISTANCE-ON-HILL EFFECT EN MEMOIRE LORS DE LA LOCOMOTION ACTIVE AVEC EFFORT PHYSIQUE MAINTENU CONSTANT

5.3.1. Introduction

5.3.1.1. *Embodied and situated spatial cognition*

Research in the field of spatial cognition investigates how individuals acquire knowledge about their environment. Empirical studies focused on people's behavior within space, in order to understand how they display spatial knowledge through navigational performance or spatial reasoning (Denis, 2018). Insights on the structure of spatial knowledge ultimately provide elements to answer one of the main questions: *what are spatial representations?* Traditionally, the first model of spatial representations referred to is Tolman's cognitive map (Tolman, 1948). Cognitive maps are initially supposed to be isomorphic allocentric representations of space created from exploration (Nadel, 2013), and found support in the discovery of hippocampal place cells in rats (O'Keefe & Dostrovsky, 1971) and humans (O'Keefe et al., 1998). However, the idea of an amodal symbolic representation that could preserve Euclidian geometry has progressively evolved, mostly because of empirical results showing that metric properties encoded in the spatial representation are not analogous, but distorted (Lieblich & Arbib, 1982; Walmsley, Saarinen, & MacCabe, 1990) and even fragmented or incoherent (Foo, Warren, Duchon, & Tarr, 2005; Weisberg & Newcombe, 2016). Inconsistencies in spatial memory have been linked with the extreme complexity of spatial material, along with limited available cognitive resources (A. Stevens & Coupe, 1978; Tversky, 1981), thus leading to the emergence of more cost-efficient clustered hierarchical models (Stephen C. Hirtle & Jonides, 1985; McNamara, 1986, 1992).

Empirical results additionally showed that spatial representations were not limited to the encoding of spatial material, as distortions could be caused by the integration of non-spatial cues such as motivations and desires (Cole & Balcetis, 2013; Spencer, Spencer, et al., 1989; Wood & Beck, 1989), emotions (Brunyé, Gardony, et al., 2012) or socio-demographical information (Maddox et al., 2008). Thereby, recent research in the field of spatial cognition widely supports constructionist theories inherited from the work of Barbara Tversky, replacing cognitive maps by the more ecologically validated metaphor of *cognitive collages* (Tversky, 1993). According to this view, different pieces of knowledge are gathered from empirical experience to construct "thematic overlays of multimedia" information, integrated

from different perspectives, systematically distorted, dynamic, incomplete and multimodal (Tversky, 1993). The rise of constructionist views on spatial representations has been favored by parallel developments of modern theories of grounded cognition. According to grounded cognition, representations are not amodal semantic constructs but emerge from the reenactment of modal stimulations such as the perceptual, sensorimotor or affective/introspective states experienced during empirical interactions with the environment (Barsalou, 2008; Gibbs, 2006). This framework emphasizes the importance of bodily states and contexts (p. ex. social, affective or spatial) on cognitive computations, thus being defined as embodied and situated views of cognition (Barsalou, 2008). Embodied and situated views on spatial cognition imply that space perception could not be seen anymore as isotropic, but rather shaped by the body, its relations with the environment and its potential for action (Franklin & Tversky, 1990). As a consequence, the influence of the body on spatial processing has been recently extensively studied. Numerous authors investigated the effect of active walking locomotion during spatial learning (see Chrastil & Warren, 2012, for a review), and found that idiothetic information contributes to the acquisition of metric knowledge (Grant & Magee, 1998; Waller et al., 2004), with the translational component of physical walking being more beneficial to spatial performances than the rotational vestibular component (Ruddle & Lessels, 2009; Ruddle, Volkova, & Bühlhoff, 2011; Ruddle, Volkova, Mohler, et al., 2011). These results corroborate the idea that body-related information extracted from physical walking contributes to the construction of spatial representations, notably with regards to the integration of metric properties linked with distances (Lhuillier, Gyselinck & Nicolas, *in preparation*). However, as stated by Tversky (1993), memory and judgments about space are systematically distorted and potentially contradictory. Hence, body-related information should not be seen as a mere facilitator from an embodied and situated view of spatial cognition: its modulating effect can sometimes generate metric estimation biases.

5.3.1.2. Action specific effects

Action specific effects can be seen as evidences of the integration of body-related information along with implicit or explicit goals during spatial processing. Following ecological approaches of perception initiated by Gibson (1979), space have been often described as “a place for action” (Gärbling & Golledge, 1989) where spatial knowledge is acquired in an action-directed way (Franklin & Tversky, 1990; Wang et al., 2012). For

example, judgment of action capability has been shown to influence distance estimation: diminishing action capability perception linked with physical movement by wearing additional weight can induce overestimation of immediate distances during an explicit distance judgment task (Proffitt et al., 2003) or while estimating gap-jumping capability (Lessard et al., 2009). This effect can be observed in relation with individual characteristics of participants: chronic walking pain (Witt et al., 2009) as well as obesity (Sugovic et al., 2016) conducts participants to estimate immediate distances as longer. Energetic cost associated with physical walking has also an effect on large-scale spatial processing, since simply wearing ankle weights during video learning of new environments decreases spatial performances on a landmark position retrieval task (Lhuillier et al., 2018). Conversely, participants who drank energy drinks and felt that their bioenergetic resources are potentiated tend to underestimate immediate distances compared to participants who drank placebo drinks (Cole & Balcetis, 2013). This effect can also be observed by manipulating blood glucose or carbohydrate levels, both predicting significant underestimation of walkable distances (Schnall et al., 2010; Zadra et al., 2016).

These results suggest that the energetic cost associated with anticipated walking can distort the use of body-related information for perceiving metric properties of the environment, while constructing spatial representations. Action specific effects on spatial processing can also be observed without any experimental manipulation of energetic costs perception, when the environment in itself provides different action potentials. For example, the effect of slants on distance perception has been considered as an evidence of anticipated energetic cost integration extracted from natural environmental cues: distances on hills are perceived farther than distances on flat planes. These results are obtained with explicit verbal estimations (Stefanucci et al., 2005) or blindfolded walking distance estimation tasks (Laitin et al., 2019; Loomis, Da Silva, Fujita, & Fukusima, 1992; Tenhundfeld & Witt, 2017). This phenomenon is referred to as the “distance-on-hill effect”, and has been attributed to implicit energy costs anticipation during action-directed spatial processing (Stefanucci et al., 2005). The distance-on-hill effect is in line with observations that slant steepness is overestimated when wearing a heavy backpack (Bhalla & Proffitt, 1999) or when observers are suffering from obesity (Taylor-Covill & Eves, 2016) or fatigue (Eves et al., 2014; Taylor-Covill & Eves, 2014). Altogether, the distance-on-hill effect and other action-specific effects described above suggest that space perception relies on the integration of visual and body-related factors (Mantel, Bardy, & Stoffregen, 2010; Rieser et al., 1995). Additionally, action-based distance

judgments are influenced by anticipated energy expenditure (White et al., 2013), thus contributing to an action-specific account on spatial perception (Proffitt, 2006).

However, these grounded interpretations of action-specific effects are not unanimously shared: various authors argued that perceptual effects are in fact masked by response biases caused by hypotheses inference. For example, Firestone and Scholl (2014) showed that top-down effects could be observed in situations where none should be observed, revealing that the experimental context influenced participants responses. Additionally, providing a plausible explanation to participants of why they are asked to wear heavy backpacks suppresses the effect of additional weight on steepness perception (Durgin et al., 2009). Taken as a whole, critics considering top-down action-specific effects warn scientific research against overly confirmatory studies and non-performance-based measures that fail to disambiguate actual perceptual effects from post-hoc judgments (for a review see Firestone & Scholl, 2016). Some recent works took into account some flaws of previous studies in order to replicate action-specific effects in a more unequivocal way. Interviews performed after the experiment by Tenhundfeld and Witt (2017) showed that participants were unable to guess the expected direction of the distance-on-hill effect. Laitin et al. (2019) replicated the distance-on-hill effect and showed that the effect persisted when response biases were neutralized by explicit feedbacks. In order to confront overly confirmatory research strategy, they also studied conditions where the effect should disappear such as comparing distances on hills (Laitin et al., 2019). Lhuillier et al. (2018) also justified the presence of ankle weights to participants in order to neutralize response biases. They nonetheless observed a detrimental effect of additional walking effort on long-term spatial memory, suggesting that anticipated energy expenditure was implicitly computed into the spatial representation independently of judgment processes.

These studies speak in favor of the idea that spatial representations could be preparing the body for action (Glenberg, 1997), as shown by the distance-on-hill effect, and that anticipated energy expenditure could play a central role in metric properties integration. Nonetheless, some flaws in previous studies were not addressed by Firestone & Scholl (2016). Action-specific effects are supported by the postulate that cognition interacts with the environment and the body (Barsalou, 2008) in an ecological context, whereas the distance-on-hill effect was always observed during passive observation. Although passive observation is one of the numerous ways to interact with the environment in an ecological way, it doesn't

include physical and dynamical interaction with spatial information such as active walking. Indeed, all studies had participants standing in a relatively unnatural situation of simply watching a slant, and then perform explicit or implicit distance estimations, but no studies asked participants to actually navigate slanted environments in an ecological way. We postulate that anticipated energy expenditure plays a role in spatial processing, but also that we need to observe how the distance-on-hill effect evolves in various tasks, especially during active spatial learning through navigation. To sum up, it is possible that the distance-on-hill effect is an oversimplified and stereotypic scenario of body-related information integration during spatial processing, and that a more task-demands driven approach is required to properly understand how body-related information is involved in the construction of spatial representations.

5.3.1.3. Goals of the present study and hypotheses

The present study aims to investigate the influence of body-related information linked with anticipated energy expenditure in complex large-scale spatial processing. Our goal is to specify how physical cost information derived from visual perception is integrated in the spatial representation, during active spatial learning in a large-scale complex environment. To do so, we chose to use the well-documented distance-on-hill effect as an action-specific effect that could reveal how body-related information and visual cues are jointly involved in metric properties processing. Traditional judgment or performance tasks used to describe this effect have specific demands that prompt individuals to a distance overestimation, presumably because they simply involve passive observation and not active exploration. In order to override this methodological issue, we will use complex route and environment learning in highly immersive virtual reality, comparing spatial learning from uphill routes and downhill routes. We take advantage of virtual reality to isolate the effect of visual slant on spatial processing by maintaining actual physical locomotion effort and walking speed constant across uphill and downhill directions using an omnidirectional treadmill. This implies that participants have to spend the exact same energy cost to walk uphill and downhill. Following our previous results (Lhuillier, Gyselinck & Nicolas, *in preparation*) and grounded views of cognition (Barsalou, 2008; Proffitt, 2006; Tversky, 1993), our hypothesis is that uphill slants contribute to overestimating distances during passive observation, but that this effect should disappear during active physical walking exploration. This hypothesis is motivated by the fact that body-related information and visual information are supposed to be integrated together,

using proprioceptive feedback to improve the accuracy of metric properties estimations (Mittelstaedt & Mittelstaedt, 2001). This means that if physical walking cost is maintained constant, active uphill walking should lead to observe a disappearance of the distance-on-hill effect or even an inversion of this effect in our protocol (because of the implicit discrepancy between visual cues of physical walking cost and unexpected ease of physical walking). To test this hypothesis, we chose to analyze performances obtained in a landmark positioning task on map using binomial geometrical analysis of coordinates (Gardony et al., 2016). Such measures provide information about metric properties retrieved from spatial representations and might be less sensible to post-perceptual judgment biases than traditional spatial memory subjective scores (Friedman & Kohler, 2003).

5.3.2. Method and Material

5.3.2.1. Participants

36 undergraduate students enrolled in Psychology (29 females, $\bar{M}_{age} = 21.53$, $SD_{age} = 3.58$) from the Paris Descartes University participated in this experiment in exchange for course credit. All participants were healthy and had normal or corrected to normal vision. Among those participants, two were excluded from the results for reporting symptoms of motion sickness due to virtual reality.

5.3.2.2. Material

Virtual environment and virtual reality apparatus A large-scale virtual city was created using Unity Software v.2017.3.0f3 (<https://unity3d.com/>). Ground surface was 300×420 meters (12.6 hectares). The environment was realistically slanted from north to south using an alternation of soft slopes (various degrees of inclination) and flat terrains, such as the vertical drop between the northernmost point and the southernmost point was 20 meters (mean slope = 4.7% = 2.69°). Road network was equally distributed among these distances and was designed to be complex in terms of orientation and layout learning. The environment featured generic urban furniture and buildings in order to evoke a realistic city (see Figure 24). In order to reduce attentional biases, no animated objects or pedestrians were included in the environment.

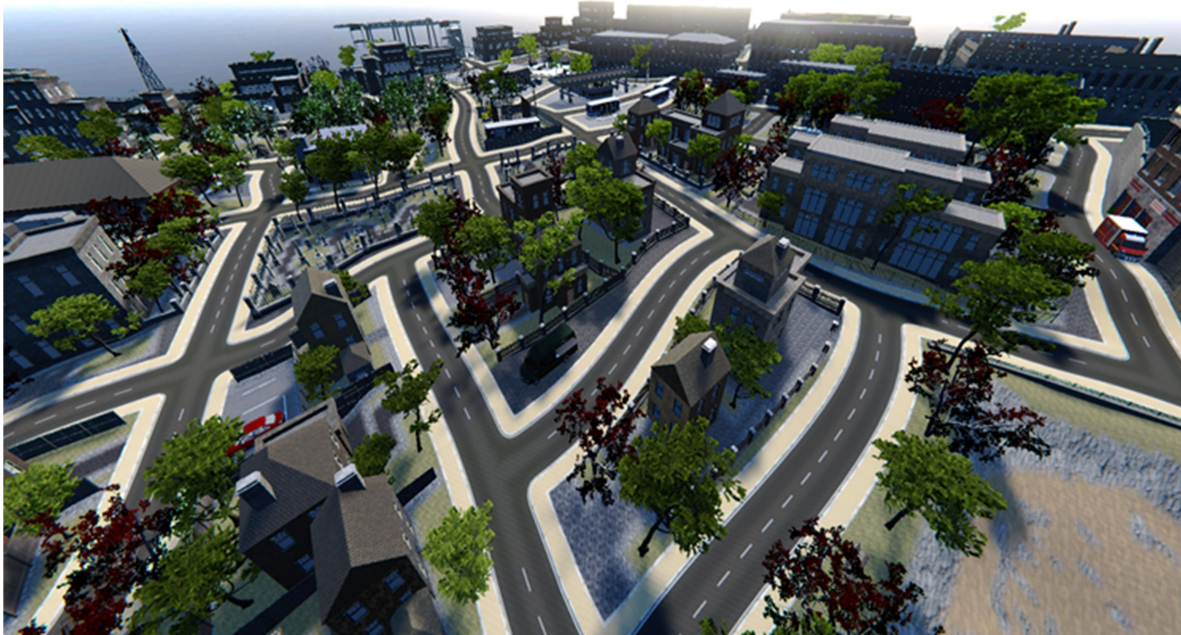


Figure 24 - Global appearance of the virtual environment, from a bird's eye view

All along the environment visually and functionally salient places defined as landmarks were placed. There were 32 different landmarks of various sizes, colors and functions (e.g. lighthouse, museum, basketball field; *see Figure 25* for visual examples). Four different routes were chosen in the environment for the route learning phase. For each of them, ten landmarks were inserted in locations strictly adjacent to the road (some landmarks were reused among routes). Routes have been controlled for number of turns and direction of turns, and were designed to be slanted such as one route could be uphill (south to north) or downhill (north to south) according to which end point was considered to be the start or the arrival (*see Figure 26* for an example of a route). Therefore each route could be used in its uphill direction or its downhill direction. A route was symbolized in the environment by the implementation of an animated arrow track in the middle of the road (evoking GPS tracks in augmented reality) and an end point (hologram like target symbol at the end of the arrow track). An omnidirectional walking treadmill was used to navigate in the environment (Omni Virtuix, <https://www.virtuix.com/>) along with a head-mounted display (HTC Vive, <https://www.vive.com/>, *see Figure 26* for full apparatus example). The treadmill required to use specific shoes, designed to slide on the treadmill surface and equipped with sensors to detect leg movements and compute walking speed. Participants were provided with single use pairs of socks and single use paper masks for the head-mounted display. In order to get participants familiar with these virtual reality devices and the navigation task, a training scene

Etude 3 : effet d'un biais d'anticipation d'effort physique de la locomotion sur les propriétés métriques de la représentation spatiale

environment has been created. It was composed by a flat ground and a very simple chunk of city. A single route track was placed in the training environment as an example of the route learning phase (one turn and one landmark). In order to reach good technical performances (more than 30 images per second and HD resolution), virtual environments were displayed using an Alienware Area 51 computer equipped with high quality processor (Intel Core i7-9800X) and high quality video card (NVIDIA GeForce GTX 1050Ti).



Figure 25 - Examples of landmarks in the virtual environment, as seen by participants

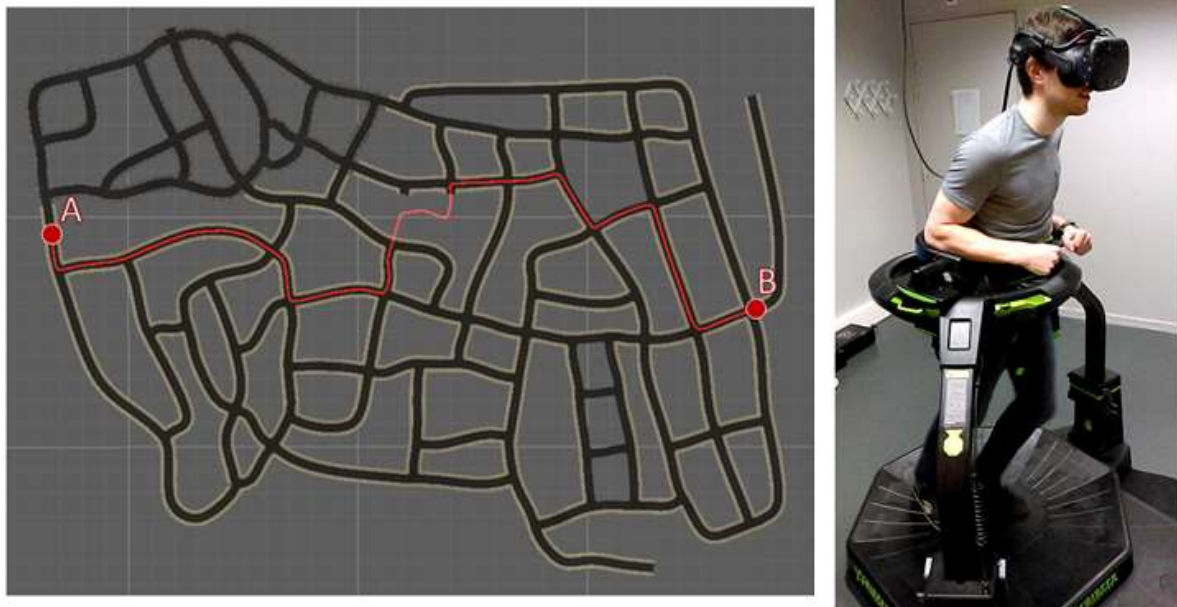


Figure 26 - Left: example of a route (A = uphill starting point; B = downhill starting point); Right: immersive virtual reality apparatus used for navigation (omnidirectionnall treadmill and head-mounted display)

Landmark recognition test

A landmark recognition test was created using Python programming language v.3.6 (<http://www.python.org>) and Neuropsychia Python module (Makowski & Dutriaux, 2017). This test was composed by pairs of images featuring an image of an actual landmark, and a distractor (same shape but textures and colors modified, *see Figure 27*).



Modified Landmark
(color & texture)



Actual
Landmark

Figure 27 - Example of a couple of images in the landmark recognition test (distractor for the item "church" to the left and correct target landmark to the right)

Route decision test

A route decision test was used to evaluate if the route was correctly learnt on an egocentric perspective. This task was also created using Python programming language and Neuropsychia module. Eight different items were used for each route. The images were taken from the participants' perspective during navigation (*see Figure 28*).



Figure 28 - Example of an item in the route decision test

Landmark position retrieval test

A landmark position retrieval test was created to measure the influence of the slopes on metric properties of the spatial representation, in an allocentric perspective. This test was also programmed using Python and NeuroPsydia. Participants were presented with a map of the entire environment displaying the road network of the city, the starting location of the previously learnt route, its ending location and a list of ten landmarks names (see Figure 29). Each landmark name was associated with an image of the landmark. The order of the landmarks in the list was randomized for each participant.



Figure 29 - Example of a landmark positioning test trial completed by a participant

Spatial Span Test

A spatial span test was used as one of the interfering tasks between learning phase and recall tasks. This was an open access computerized version of the Corsi block-tapping test (Corsi, 1972) available online through the PsyToolKit website (<https://www.psytoolkit.org/experiment-library/corsi.html#refs>).

Questionnaire

4 different questionnaires were used in this study to gather control measures, but also to serve as interfering tasks between route learning phase and recall tasks, and served. All questionnaires were directly implemented in Python programming language using the Neuropsydia module. The first questionnaire is the French adaptation of the revised presence questionnaire (Witmer, Jerome, & Singer, 2005). This questionnaire is composed by 19 items (haptic and auditory items were not used in the present study) relative to various aspects of the feeling of presence regarding the current virtual environment. Participants used the mouse to answer each question on a Likert-like 7 points scale. Scores were divided into 5 sub-scales evaluating a component of the feeling of presence in virtual reality: realism, possibility of acting, quality of the interaction, possibility of examination and auto-evaluation of the performance. For psychometric qualities and factor structure of the presence questionnaire, see Witmer, Jerome and Singer (2005).

A habits questionnaire was created to collect information about spatial tasks performed by participants on a daily basis and the frequency of their practice of sports. This questionnaire is composed of 11 items on a four points scale (zero being “not at all” and four “every time” or “absolutely”).

A short french version of the Bem Sex Role Inventory scale (BSRI, Bem, 1981) was also applied. It was composed by the 20 items chosen by Colley and coworkers for their factorial analysis (Colley, Mulhern, Maltby, & Wood, 2009). The goal of this questionnaire is to measure stereotypical masculinity and femininity by asking participants to rate how much they think that culturally gendered personality traits fit for describing themselves (on a Likert-like 7 points scale). Among these items, 10 yield a femininity score (p. ex. “I love children”) and the other 10 provide a masculinity score (p. ex. “I am willing to take risks”). As this questionnaire provides a good indication of how individuals integrate cultural gender stereotypes to describe their own personality, we used it to make sure that stereotypes on gender differences were not influencing performances in spatial processing during the present study. For psychometrics characteristics and factorial structure of the short BSRI scale (20 items), see Colley et al. (2009).

We also used the QSR (questionnaire on spatial representations, Pazzaglia, Cornoldi, & De Beni, 2000), which is designed to gather information about individuals' subjective perception of their own spatial abilities and preferential spatial strategies. It is composed of eight items on a five points scale and three items on a three points scale. Responses contributed to 6 different subscales: global spatial abilities, preference for allocentric map-like representations of space (survey perspective), preference for egocentric first-person format of representation (route perspective), good knowledge and use of cardinal directions, indoor and outdoor sense of orientation, and preference for landmark focused strategy. In the present study, global spatial abilities were used to control inter-individual variability in spatial processing, but route and survey preferences were used as fixed effects factors (*see statistical analyses*). Psychometric characteristics of the QSR can be found in Pazzaglia et al. (2000).

5.3.2.3. Procedure

Each participant was received individually in a soundproof room for between one hour and a half and two hours (depending of participants' speed and length of pauses). Participants were first asked to sign a consent form adapted for virtual reality protocols. They then communicated various sociodemographic and individual information before being installed in the omnidirectional treadmill. The experimenter explained how to use the walking device and participants were invited to train to walk without wearing the head-mounted display until they felt physically comfortable. They were then equipped with the head-mounted display and were asked to walk in a straight line in the training virtual environment, until they felt like they could easily control their walking speed and direction. They were then trained to the route learning phase: the experimenter informed them that they would have to learn a route by following a GPS track on the ground, while paying attention to the environment and places they saw during their navigation. They were informed that no time limit was imposed for this phase, that they could walk at their natural comfortable speed, and that they were allowed to stop walking for looking all around them at any time they wanted. Participants were then asked to follow an example training route until they reached a designated landmark ("white trucks"). Participants were informed that they would have to recall the position of salient places and elements during route learning because they would have to recognize them later among distractors, and place them on a map. They were also informed that they would be presented with intersections they travelled during the learning phase in order to test whether they would be able to choose the correct street (route decision test).

After the completion of the training route, participants were “teleported” at the starting point of their first test route in the large-scale virtual environment. Each trial was then composed as follows: 1) route learning phase; 2) presence questionnaire 3) additional interfering task (questionnaire or spatial span task); 4) Landmark recognition test; 5) Route decision test; 6) Landmark position retrieval test; 7) Pause (if needed). For each trial a different route was used and overall, each participant learned two uphill routes and two downhill routes (slope and route order was counterbalanced). Among all participants, each route was used in the uphill direction and the downhill direction, but a route could only be either uphill or downhill for a single participant. After completing the route training phase, they were asked to estimate their travel time and distance. They then took off the apparatus and sat in front of a computer (Gigabyte P35X v6; 15.6-inch screen), where they were presented the presence questionnaire that they had to complete for each route.

After this questionnaire, they had to complete another interfering task, whose nature depended on the trial: the habits questionnaire for the first route, the spatial span test for the second route, the short BSRI for the third route and the QSR for the last route. For all questionnaires, they were instructed that no time limit was imposed but that they would have to give their most spontaneous responses. For the spatial span test, each trial was composed by a set of nine squares appearing in the screen at random positions. Some of these squares then begin to briefly flash one after the other, forming an ordered sequence of position that the participants have to memorize. At the end of the sequence, an audio signal informs participants that they can move the mouse and reproduce the sequence in the same order by clicking on the squares. After the last square have been clicked on, participants have to click on a green square located at the bottom right corner to validate their trial and a feedback is given to them (smiling face for correct sequence, frowning face if at least one error had been made). The first trial consists of a sequence of two squares, each time the sequence is correctly reproduced a novel sequence triggers with one additional square than the previous one. If a participant fails to reproduce the sequence, a new trial triggers with the same number of position than the previous sequence. Two consecutive failed trial stops the task and the number of positions in the highest succeeded sequence is recorded as being the spatial span of the participant.

When they had completed the interfering task, participants were presented the retrieval tasks, starting with the landmark recognition test, and the route decision test. In the landmark

recognition test, participants had to choose which of the two displayed images of a landmark they had seen during the learning phase by pressing the left or right arrow on the keyboard. For each trial, one image represented the exact same landmark they had seen during the learning phase, and the other image represented a distorted version of the landmark in which textures and colors have been changed. Side of the correct item was randomized. All responses were given using the keyboard. After each response, the program asked to give temporal, spatial, contextual and intrinsic details about the landmark. These details were given orally and were coded by the experimenter in order to verify that landmark recognition responses were not randomly chosen by participants. Six random landmarks out of the ten possible landmarks per route (but same landmarks for each participant) were used in this test. No time limit was imposed but responses times were recorded, along with correct answers.

In the route decision test, an image of an intersection encountered during the learning phase was presented. For each image, participants had to choose if they took the right road or the left road during learning, using right or left arrow on the keyboard. Eight different intersections were tested for each route. Order was randomized so that intersections were not presented in chronological order according to the route. No time limit was imposed but responses time and accuracy were recorded. After the last item of the route decision test, the experimenter explained the landmark position retrieval test on the map and participants had all the time they needed to complete it. In this task, participants had to position the landmarks they encountered during the learning phase on a map of the environment. Participants were asked to click once (using the computer mouse) on a landmark in the list to select it, before clicking a second time on the map to position the selected landmark on the absolute position of the cursor. When participants selected a landmark, an image of it appeared in the bottom right corner in order to make clear what name was referring to which landmark. In order to promote spontaneous responses and limit non-spatial strategies, selected landmarks had to be positioned and participants were not able to re-select it to move it again. No time limit was imposed and coordinates of the positioned landmarks were recorded (*see Figure 29* for an example of completed map). The end of this task marked the end of a trial. Participants were given the choice to continue with the next trial, or to have a short break. Fresh bottles of water were provided to the participants during all the experiment, and a fan was installed in front of the treadmill (that was started upon request). After finishing the fourth trial, participants took off the equipment, which was cleaned and disinfected for the next participant.

5.3.3. Résultats

Statistical Analyses The analyses were carried out using R software version 3.4.0 (R Development Core Team, 2017). In order to examine the effect of slanted slopes on spatial memory, multiple linear-mixed-effects regressions were performed with the lme4 package version 1.1-8 (Bates et al., 2015), selecting the direction of the Slope (two modalities, uphill or downhill) as a fixed effects factor. As spatial perspective has been shown to have an effect on situated and embodied components of spatial processing (Brunyé, Mahoney, & Taylor, 2010), we chose to use spatial perspective preferences (both route and survey) obtained through the QSR as a second and third fixed effects factors. In order to control sources of variation and to isolate the direction of the Slope effect, we included random effects with random intercepts for participants, routes (to control for variations in difficulty), rank of the routes (to control for learning effects and/or fatigue effects), age of participants, daily walking time (to control for differential “expertise” in the use of walking for spatial processing among all participants), and estimated global spatial abilities obtained through the QSR. Presence questionnaire and short BSRI scale answers were used to make sure that participants sample were homogeneous but were not included in the statistical models (*see Table 1 and Table 2 in annexes*).

All models have been tested with analyses of variance (ANOVA) in order to assess the existence of main effects. Coordinates of landmarks from the landmark position retrieval test were analyzed using the GMDA software (Gardony et al., 2016) to compare them with absolute Cartesian coordinates of the target map. By performing pairwise comparisons between landmarks positions, this tool yielded 4 dependent measures that we chose to use for this study: 1) Correlation (Bravais-Pearson coefficient indicating how close the spatial layout given by participants is to the actual map, ranged from 0 to 1), 2) Angle Accuracy (global magnitude of inter-landmarks angular precision, ranged from 0 to 1), Distance Accuracy (global magnitude of inter-landmarks distance precision, ranged from 0 to 1), and Scale (measures the direction of inter-landmarks distance errors, ranged from -1 to 1 where scores below 0 indicate that participant tended to under-estimate distances compared to the actual map, and score above 0 point out that participant over-estimated distances compared to the actual map). The statistical analysis procedure was then used for seven dependent measures: landmark recognition average score, route decision average score, implicit walking speed

estimations, Correlation, Angle Accuracy, Distance Accuracy and Scale. Time and distance estimations gathered after each route training phases were used to calculate the implicit walking speed estimations (from the ratio between estimated time and distances). All measures have been transformed using the Tukey's Ladder of Powers Transformations (Tukey, 1977) in order to tackle the skewness of distributions and ensure the normality of the data. Each model was tested for abnormally deviant observations (outliers) using the Cook's Distance method (Cook & Weisberg, 1982). We adopted a classical cut-off value of $Di > 4/n$ (where "Di" is the cook distance of an observation and "n" is the total number of observations) to remove abnormal influential values (Bollen & Jackman, 1990). The first trial/route was excluded from the analysis as descriptive analyses revealed a particularly high dispersion for the first trial only, especially for the Correlation and Scale measure from the landmark position retrieval test (see Table 3). This suggested that, in spite of the use of a training phase participants were still training in their first route, thus making it impossible to analyze the first trial as a test trial. Therefore three trials per participants were analyzed.

Landmark recognition average score Direction of the Slope did not significantly predicted landmark recognition mean scores ($\beta = -.003$, $SE = .039$, $t = -0.069$, $p = .94$), but a significant coefficient was found for both route perspective preference ($\beta = .027$, $SE = .011$, $t = 2.254$, $p = .03$) and survey perspective preference ($\beta = .023$, $SE = .008$, $t = 2.8$, $p = .009$). The higher the route or survey perspective preferences, the better the results.

Route decision average score Direction of the slope significantly predicted performances for the route decision test ($\beta = -.122$, $SE = .037$, $t = -3.269$, $p = .001$): average route retrieval from pictures of intersection was better for downhill routes ($\bar{M}_{downhill} = .86$, $SD = .14$) than uphill routes ($\bar{M}_{uphill} = .80$, $SD = .15$). No significant coefficient of perspective preferences was observed for this measure.

Implicit Walking speed estimations Direction of the slope did not significantly predicted implicit walking speed estimations derived for distances and times estimations ($\beta = -1.23$, $SE = .1.597$, $t = -.767$, $p = .45$). No significant coefficient was found for route perspective preference ($\beta = -1.043$, $SE = .1.59$, $t = -.067$, $p = .52$) or survey perspective preference ($\beta = .84$, $SE = 1.135$, $t = .736$, $p = .47$).

Distance Accuracy A significant coefficient was observed for the direction of the slope regarding inter-landmark distance accuracy in the landmark position retrieval test ($\beta = -$

.054, $SE = .018$, $t = -3.011$, $p = .004$): participants showed better distance accuracy in positioning landmarks on the map for downhill routes ($\bar{M}_{downhill} = .89$, $SD = .04$) than for uphill routes ($\bar{M}_{uphill} = .85$, $SD = .05$). Route perspective preference or survey perspective preference did not significantly predicted distance accuracy scores.

Angle Accuracy Inter-landmark angular accuracy in the landmark positioning test was significantly predicted by the direction of the slope ($\beta = -.079$, $SE = .03$, $t = -2.64$, $p = .01$): downhill routes led to better results ($\bar{M}_{downhill} = .84$, $SD = .09$) than uphill routes ($\bar{M}_{uphill} = .75$, $SD = .17$). Furthermore, a significant coefficient was found for route perspective preference ($\beta = .039$, $SE = .018$, $t = 2.21$, $p = .035$), meaning that the more participants preferred to use this perspective for solving spatial tasks, the more accurate they were in inter-landmark angular accuracy (see Figure 30). No significant coefficient was observed for survey perspective preference ($\beta = .003$, $SE = .012$, $t = .28$, $p = .78$).

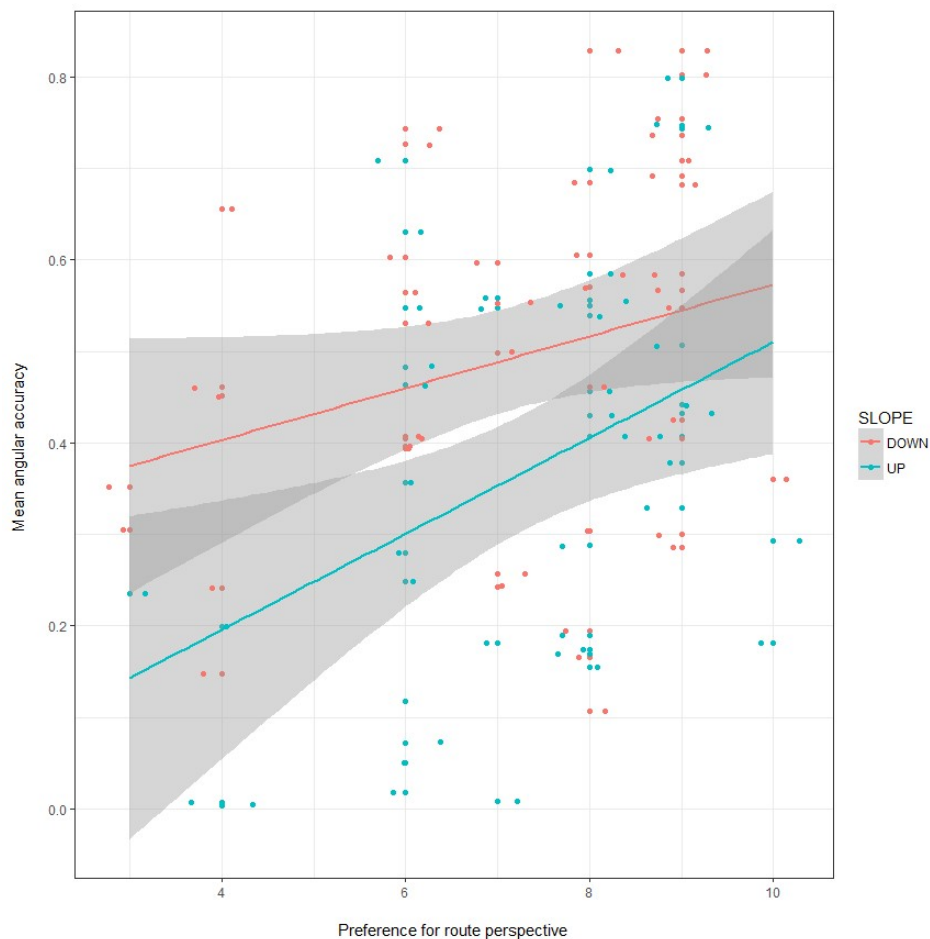


Figure 30 - Mean Tukey transformed Angle Accuracy scores as a function of direction of the slope and preference for route perspective for experiment 1

Correlation Analysis of the correlation between actual landmark positions and landmark positions given by participants yielded a significant coefficient of the direction of slope ($\beta = -.129$, $SE = .042$, $t = -3.096$, $p. = .003$). Downhill routes led to better correlations between participants' positions of landmarks and actual positions of the landmarks than uphill routes ($\bar{M}_{downhill} = .87$, $SD = .097$; $\bar{M}_{uphill} = .75$, $SD = .21$). No significant coefficient was found for survey perspective preference ($\beta = 0.004$, $SE = .016$, $t = 0.24$, $p. = .81$), but route perspective preference yielded a trending coefficient ($\beta = .045$, $SE = .023$, $t = 1.983$, $p. = .057$). This suggests that high route perspective preference could impact correlations, even though this coefficient is just above the significance threshold.

Scale A significant direction of the slope coefficient was observed for the Scale measure ($\beta = -.078$, $SE = .034$, $t = -2.28$, $p. = .025$): although participants tended to underestimate all distances on the map, they even more under-estimated distances for uphill routes ($\bar{M}_{uphill} = .65$, $SD = .22$) than for downhill routes ($\bar{M}_{downhill} = .76$, $SD = .16$). No significant coefficient was found for route and survey perspective preferences regarding this measure (see Figure 31).

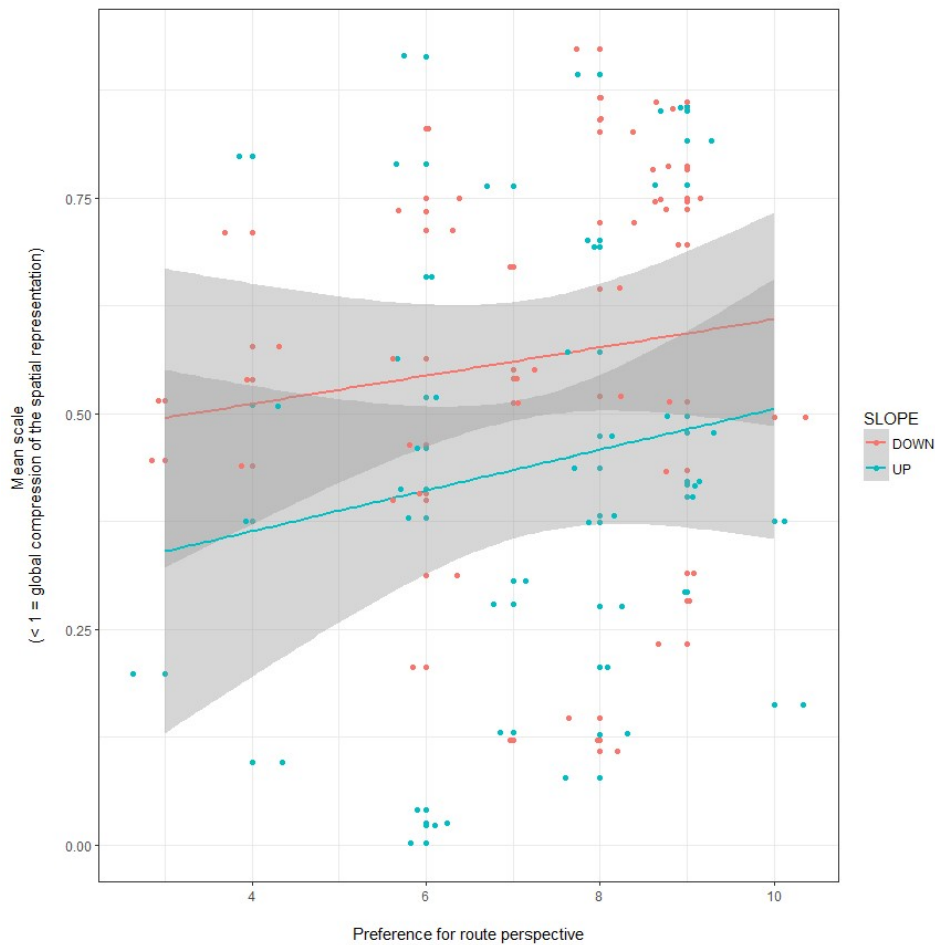


Figure 31 - Mean Tukey transformed Scale measure scores as a function of direction of the slope and preference for route perspective for experiment 1

5.3.4. Discussion (expérience 1)

The goal of Experiment 1 was to show that implicit visual walking effort clues that could be extracted from slanted slopes could influence the encoding of metric properties in the spatial representation, even in the absence of confirmatory sensorimotor clues such as actual walking effort increase. Experiment 1 showed that perceived slanted slopes has an effect on spatial learning when physical effort and walking speed are kept constant. This effect seems specific to spatial processes as shown by the absence of an effect on a more episodic component of spatial memory (recognition of landmark's appearance). More precisely, uphill slopes made it significantly more difficult to recall the correct route when participants were presented to an image of a previously encountered intersection. Uphill slants led to distortions in the metric properties of the spatial representation: participants had more difficulties to estimate distances and angles between landmarks on the landmark position

retrieval test on a map, thus in a survey perspective. Overall, the correlation between landmarks measured positions and actual landmarks positions derived from uphill routes was lower than the correlation derived from downhill routes, which shows a global distortion of the spatial representation caused by uphill slants.

Results of the Scale measure (from the GMDA software) showed that uphill routes led to a significant underestimation of all distances, compared to downhill routes. Though all participants tended to underestimate distances as it is generally observed with virtual reality material (Plumert, Kearney, Cremer, & Recker, 2005), the global compression of the spatial representation was higher for uphill routes than for downhill routes. This effect is opposed to the classical results regarding the distance-on-hill effect (Laitin et al., 2019; Stefanucci et al., 2005), that states that distances on hills are perceived as longer than distances on flat planes. This observation does not seem to be linked with an implicit underestimation of walking speed associated with uphill slants, as we did not observe any difference between uphill and downhill routes for implicit walking speed estimations. This suggests that the inverted distance-on-hill effect could be linked with distortions in the integration of the distance/effort ratio, independently of the walking speed. However, it is important to note that the absence of difference observed for implicit walking speed estimations could also be attributed to the important variability of responses during time and distance estimations.

The distance-on-hill effect is generally interpreted as an action-specific effect on visual perception, suggesting that walking an uphill slant would be more physically costly than walking a flat plane, hence leading individuals to implicitly overestimate distances. Previous studies in this field used a distance judgment protocol where participants had to stand still in front of a hill, not to physically walk the slant. This may explain the use of implicit strategies of body preservation, such as overestimation of distances on hills or planning biases aiming to engage in avoiding behaviors (see Brunyé, Mahoney, Gardony, & Taylor, 2010, for an example of this type of judgment bias). We can thus hypothesize that the specific demands of our active walking task in uphill slants led participants to bypass these types of body-preservation biases. In our experiment, participants were asked to memorize spatial information, and not to perform a judgment task, meaning that walking effort sensorimotor information could not be avoided. It could rather be used as additional information to compute metric properties in the spatial representation. Walking effort information in real life is generally coherent with visual information (optic flow and slant

perception), thus helping with the encoding of metric properties. However, this synchrony between visual and sensorimotor information was not respected in our study. Since optic flow and actual physical effort were kept constant, and thus distorted compared to actual walking, an interpretation is that the compression of distances observed for uphill routes is linked to implicit compensation processes aiming to solve these two types of transgressions. The global compression of distances for uphill routes could be explained by two types of processes linked with perceptual implicit biases: a recalibration process of the perceived walking speed, or a recalibration process of the perceived physical cost.

Concerning the explanation dealing with the walking speed recalibration, participants could have experienced a biased walking speed perception because of uphill slants: uphill slants are implicitly associated with slower locomotion from their empirical experience. Thus, even in the absence of an actual slower walking speed in experiment 1, they could have applied an implicit heuristic on perception and/or memory such as: the route is uphill, then walking speed must be slower, then less distance must have been actually travelled than what optic flow perceived. This kind of implicit walking speed bias could then have produced a global underestimation of distances for uphill routes compared to downhill routes. On the other hand, concerning the explanation dealing with the perceived physical cost explanation, participant could have implicitly compensated for the absence of the additional energy expenditure that they expected from visual perception of uphill slants. In this case, less experienced physical effort than what was expected from visual information means less distance travelled, because an increase of physical cost is associated with an increase of the travelled distance from empirical experience (Laitin et al., 2019; Proffitt, 2006). Thus, at the end of the route if less energetic resources than expected have been used, global distances in memory should be recalibrated to be underestimated.

In order to disambiguate these two explanations, a second experiment was designed where participants were equipped with loaded ankle weights, which have been previously shown to both increase perceived physical walking effort and lower perceived walking speed (Lhuillier et al., 2018). In this situation, we can expect a vanishing of the inverted distance-on-hill effect, but both explanation leading to a different specific effect on either uphill or downhill routes compared to experiment 1:

- If ankle weights lead to a global underestimation of distances learnt from downhill routes without any effect on uphill routes, then the walking speed calibration

explanation should fit better to explain the inverted distance-on-hill effect observed in experiment 1. In this case, participants already estimate themselves slower during uphill walking, thus leading to a ground effect that causes ankle weights to marginally affect (or not affect at all) uphill routes. Conversely, downhill walking speed should be perceived as slower, thus global downhill distances should be underestimated just like uphill distances in experiment 1, causing distances retrieved from uphill and downhill routes not to differ anymore.

- However, if global distances for downhill route are not affected by ankle weights, but global distances for uphill routes are no longer underestimated, then physical cost recalibration should be a more satisfying explanation for the inverted distance-on-hill effect observed in experiment 1. In that case, loaded ankle weights should solve the transgression of expected physical cost experienced by participants in experiment 1, thus increasing performances for uphill routes by putting participants in a more realistic condition (compared to experiment 1). Then, no recalibration of global distances should be observed for uphill routes. As downhill routes are not considered physically costly by participants, ankle weights should have little to no effect on spatial performances for this condition. Verifying this second hypothesis would support predictive coding theories (Friston, 2005; Rao & Ballard, 1999) by showing evidences for automatic minimization of proprioceptive prediction errors (Friston, 2012).

Following Firestone & Scholl (2016) guidelines for action-specific effects investigation, we expect a suppression of the slanted slopes effect with the addition of ankle weights (whatever the explanation), thus addressing the pitfall of overly confirmatory studies. Similarly to previous studies (Lhuillier et al., 2018; Tenhundfeld & Witt, 2017), response biases were prevented by providing a tangible explanation to the use of ankle weights.

5.4. EXPERIENCE 2 : SUPPRESSION DU DISTANCE-ON-HILL EFFECT EN MEMOIRE PAR L'AUGMENTATION DU COUT ENERGETIQUE REEL

5.4.1. Méthode

Experiment 2 replicated the method of experiment 1, with the only exception that participants were equipped with loaded ankle weights after the training phase.

5.4.1.1. *Participants*

45 undergraduate students enrolled in Psychology (34 females, $\overline{M}_{age} = 20.57$, $SD_{age} = 3.33$) from the Paris Descartes University participated in this experiment in exchange for course credit. All participants were healthy and had normal or corrected to normal vision. Among this sample, 3 participants were excluded from the results for reporting symptoms of motion sickness due to virtual reality.

5.4.1.2. *Materiel*

All material and apparatus were the same as those of experiment 1, apart from for the landmark recognition test and the presence questionnaire that were removed.

Ankle weights We used weighted ankle belts to apply additional physical locomotion effort to participants. Similarly to a previous study (Lhuillier et al., 2018), ankle weights were meant to increase both physical resources used for efferent motor actions and proprioceptive feedback of the effort spent for legs motion. Ankle weights weighted around 5% of the participant's mass, distributed between the two ankles (e.g. a 60kg participant wore 1.5kg loaded belts for each ankle).

5.4.1.3. *Procedure*

Participants underwent the same exact procedure as in experiment 1, with the two only exceptions being the removal of the landmark recognition test and the fact that the experimenter equipped them with ankle weights after the training phase. They were asked to keep the ankle weights for the whole duration of the study, and ankle weights were presented as devices containing various sensors such as accelerometers and speedometers.

5.4.2. Résultats

The exact same statistical analyzes were performed in experiment 2, using the same variables as fixed effects factors and random effects factor. We replicated the same procedure for outliers' detection. The data of the first trial was also removed from the analysis in order to replicate the exact same analysis method than in experiment 1.

Route decision average score Direction of the Slope yielded no significant coefficient on route decision mean scores ($\beta = .046$, $SE = .064$, $t = .715$, $p = .48$). Route perspective preference did not predict route decision performance ($\beta = -.0005$, $SE = .017$, $t = -.032$, $p = .98$), but survey perspective showed a tendency to predict it ($\beta = -.015$, $SE = .008$, $t = 1.85$, $p = .07$).

Implicit Walking speed estimations Direction of the slope did not significantly predicted implicit walking speed estimations ($\beta = -.005$, $SE = .004$, $t = -1.152$, $p = .25$). No significant coefficient was neither found for route perspective preference ($\beta = -.008$, $SE = .012$, $t = -.059$, $p = .55$) or survey perspective preference ($\beta = -.003$, $SE = .006$, $t = -.514$, $p = .612$).

Distance Accuracy Direction of the slope did not predict inter-landmark distance accuracy from the landmark positioning test on map ($\beta = .01$, $SE = .02$, $t = .509$, $p = .63$). Route perspective preference showed no significant coefficient ($\beta = .0001$, $SE = .01$, $t = .003$, $p = .99$), but survey perspective preference showed a significant coefficient for distance accuracy ($\beta = .016$, $SE = .006$, $t = 2.43$, $p = .021$). This suggests that participants who tended to preferentially use map-like strategies retrieved better inter-landmark distances when equipped with ankle weights. Route perspective strategies did not allowed participants to retrieve more accurate distances when equipped with ankle weights.

Angle Accuracy Inter-landmark angular accuracy in the landmark positioning test was not predicted by the direction of the slope ($\beta = .0007$, $SE = .044$, $t = .237$, $p = .82$). Again, no significant coefficient was observed for route perspective preference with the addition of ankle weights ($\beta = .02$, $SE = .02$, $t = 996$, $p = .33$), but a significant coefficient was found for survey perspective preference ($\beta = .033$, $SE = .01$, $t = 3.15$, $p = .003$). Survey perspective strategies increased inter-landmark angular accuracy, but not route perspective

strategies (see Figure 32). For a comparison between direction of the slope effect for Angle Accuracy measure across experiment 1 and 2, see Figure 33.

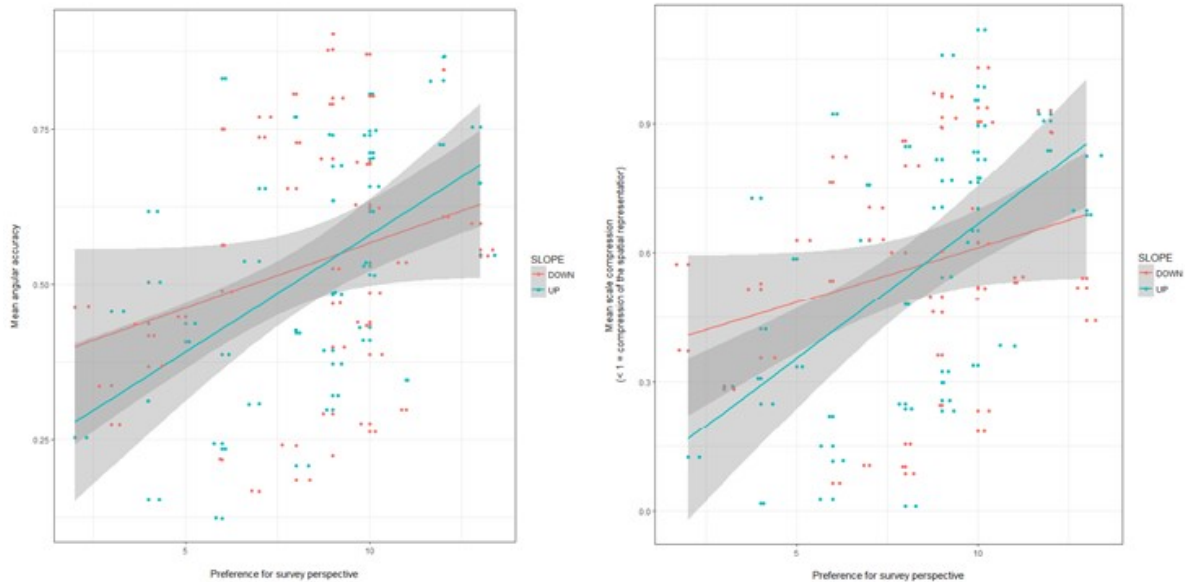


Figure 32 - Left: mean Tukey transformed Angle Accuracy scores as a function of direction of the slope and preference for survey perspective for experiment 2; Right: mean Tukey transformed Scale measure scores as a function of direction of the slope and preference for the survey perspective for **experiment 2**

Correlation Direction of slope did not predict correlation between actual landmarks positions and coordinates given by participants when they were equipped with ankle weights ($\beta = -.029$, $SE = .049$, $t = -.586$, $p = .58$). No significant coefficient was found for route perspective preference ($\beta = 0.014$, $SE = .03$, $t = .461$, $p = .65$), but a significant coefficient was observed for survey perspective preference ($\beta = .043$, $SE = .015$, $t = 2.78$, $p = .009$).

Scale Hypotheses predicted an absence of effect of the direction of the slope on the Scale measure, once participants were equipped with ankle weights. As expected, direction of the slope did not predict scores on the Scale measure ($\beta = .034$, $SE = .039$, $t = .873$, $p = .41$): global distances retrieved from downhill routes are the same as distances retrieved from uphill while wearing ankle weights ($\bar{M}_{uphill} = .74$, $SD = .23$; $\bar{M}_{downhill} = .76$, $SD = .17$). No significant coefficient was found for route perspective preference ($\beta = .033$, $SE = .039$, $t = 1.142$, $p = .26$), but survey perspective preference was significantly linked with the Scale measure ($\beta = .049$, $SE = .014$, $t = 3.355$, $p = .002$). The more participants tended to prefer survey

Etude 3 : effet d'un biais d'anticipation d'effort physique de la locomotion sur les propriétés métriques de la représentation spatiale

perspective strategies, the less they compressed distances in the landmark position retrieval test (see Figure 32). As participants in the first experiment underwent the same protocol as participants in experiment 2 (with the only exception being the ankle weights), we propose to compare results obtained for each experiment in order to have an idea of the specific influence of additional effort during this task. For a comparison between direction of the slope effect for the angular accuracy and the Scale measure across experiment 1 and 2, respectively see Figure 33 and Figure 34.

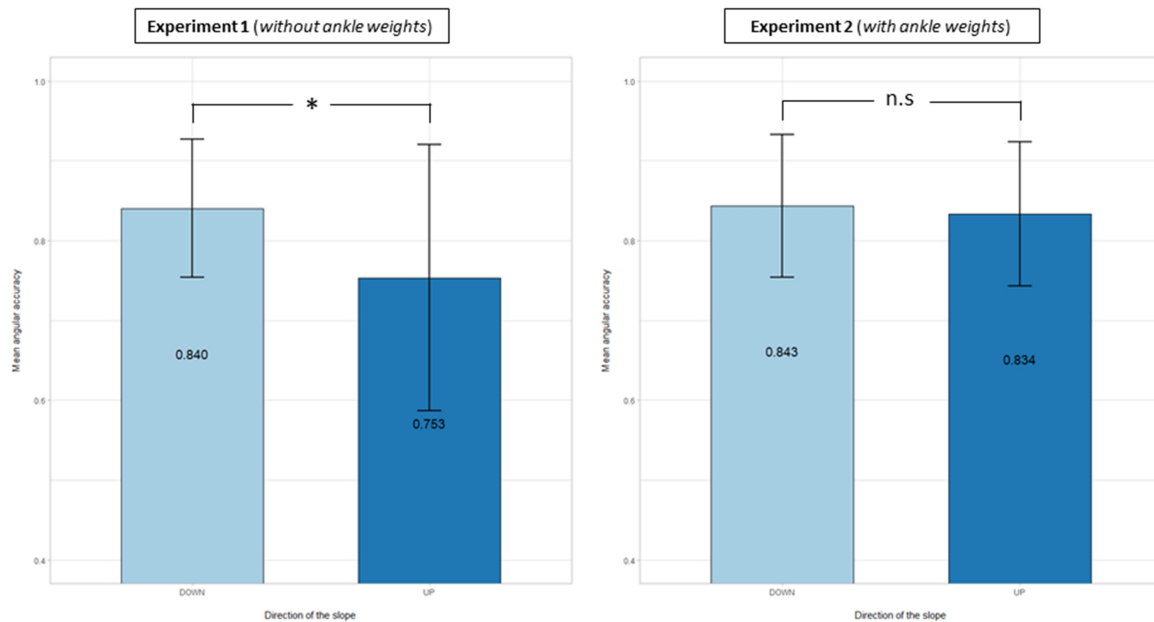


Figure 33 - Increase in angular accuracy performance for uphill slanted routes with the use of loaded ankle weights

Etude 3 : effet d'un biais d'anticipation d'effort physique de la locomotion sur les propriétés métriques de la représentation spatiale

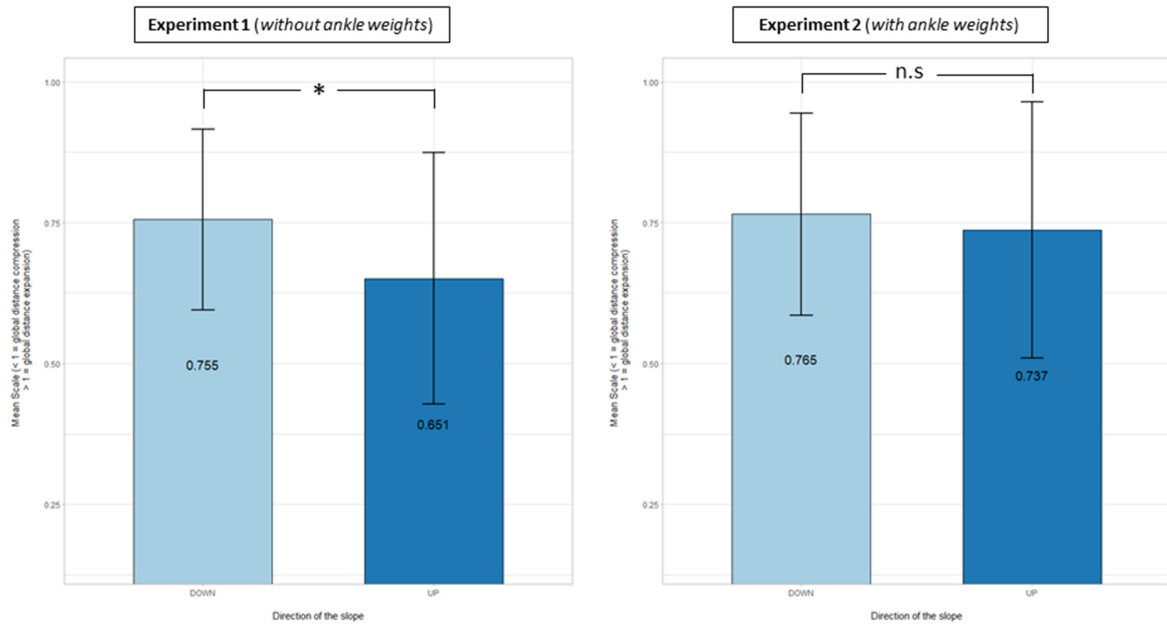


Figure 34 - Decrease in global compression of the spatial representation for uphill slanted routes with the use of loaded ankle weights

5.4.3. Discussion (expérience 2)

The effects of visually perceived slanted slopes on spatial performances were suppressed by making participants wear ankle weights. In contrast with experiment 1 where uphill distances were underestimated compared to downhill distances, experiment 2 showed no differences between uphill and downhill distances when wearing ankle weights. More precisely, it appeared that the additional walking physical effort caused by wearing ankle weights had no effect for downhill slanted routes, but improved performances for uphill slanted routes compared to experiment 1 (thus causing uphill and downhill routes to not differ in experiment 2). This increase in performances can notably be seen by the vanishing of angular errors and distances compression for uphill routes compared to experiment 1 (*see Figures 33 and 34*). These results are in line with the hypothesis that distortions in spatial memory caused by visual uphill slants (observed in experiment 1) were linked to compensation processes, implicitly aiming to solve the absence of actual additional physical cost for uphill routes. More especially, these results suggest that the implicit compensation in distances take place when there is a discrepancy between visual information and sensorimotor information (visual slanted slopes without increased walking effort), in order to reduce the proprioceptive prediction error (Friston, 2012). Moreover, experiment 2 revealed that wearing ankle weights reduces the beneficial effect of preference for route strategies (e.g. Angle

Accuracy measure). While wearing ankle weights, participants who tended to preferentially use survey perspective strategies were able to retrieve more accurate distances, angles and global shape of the spatial representation. This suggests that the additional physical effort could implicitly impair the efficiency of body-centered strategies used in route perspective.

5.4.4. Discussion Générale

In a first experiment, we observed that anticipated physical energy expenditure cues impacted not only spatial perception during exploration, but also metric properties retrieved from spatial representation (using a landmark position retrieval test on maps). This body-related effect of anticipated physical cost seems specific to spatial processing, as it was absent for a visual but non-spatial episodic task such as the landmark recognition test. More precisely, learning routes by travelling uphill slants in virtual reality led to a decrease in angular and distance accuracy of the whole coordinates layout compared to downhill slants, in the absence of differences concerning actual energy expenditure and actual walking speed. The effect of visual only energy cost cues such as slanted slopes on long-term spatial retrieval is in line with the idea that the world is perceived as effort (Berkeley, 2002) and action potentials (Gibson, 1979), thus leading towards an action-specific account of spatial perception (Proffitt, 2006). Our results also suggest additionally that action-specific effects on spatial perception are maintained in memory and can influence the retrieval of metric properties of spatial representations. This could participate to the construction of “efficient representations” of spatial layouts, including geometry distortions that promote “effective, efficient and safe behavior” (Proffitt, 2006). However, we observed here a special case of the classical results subtending these types of theoretical frameworks: the direction of the distance-on-hill effect was inverted in our protocol (global underestimation of distances for uphill routes rather than global overestimation). Experiment 2 was designed to find out if this inversion could be attributed to constant physical cost across uphill and downhill routes during the first experiment: global underestimation of uphill distances disappeared when additional energy cost was applied using weighted ankle belts. This substantiates an economy of action account stating that perceptions and misperceptions in particular are a function of bioenergetics costs of navigating the environment (Schnall et al., 2010; Zadra et al., 2016). Active navigation in uphill routes lead to the encoding of misperceptions derived from bioenergetics costs in the first experiment, where those costs were evaluated as lower than expected, thus leading to a recalibration of distances perception and encoding. It is also possible that the effect of ankle weights on uphill distances recalibration could be attributed to

judgment processes instead of actual distances biases from memory (Firestone & Scholl, 2016). However this alternative explanation does not seem sufficient here, as ankle weights did not affect downhill routes. Additionally, participants did not report naïve hypotheses consistent with the goals of the experiment during the debriefing phase, consistently with recent work showing that participants are usually not aware of distance-on-hill effects (Tenhundfeld & Witt, 2017).

The recalibration process derived from the transgression of expectations introduces the crucial importance of predictive-coding theories in the field of spatial processing (Friston, 2005; Rao & Ballard, 1999). Predictive-coding views of cognition support the idea that perception corresponds to hypothesis-testing (Gregory, 1980) in which priors are formed from empirical experience and continuously used to generate predictions. These predictions are generated to explain how sensory inputs emerge, including a natural drive to minimize proprioceptive prediction errors (Friston, 2012). As shown by classical distance-on-hill studies, implicit visual cues of higher energy expenditure (slants) lead to the prediction of longer distances and steeper angles presumably because individuals have integrated the relation between uphill slants and higher locomotion difficulty. In the present work, we showed that transgressing proprioceptive predictions of anticipated energy cost through the use of virtual reality forced individuals to a recalibration of distances perception (experiment 1), but also that active navigation with coherent/confirmatory sensory input could lead to the encoding of fairly accurate metric properties (experiment 2). Predictive-coding theories and action-specific accounts of spatial perception both contribute to a “common framework of cross modal information variable” (Mantel et al., 2010; White et al., 2013), in which space is computed from optic and body-related information (Mittelstaedt & Mittelstaedt, 2001) to minimize proprioceptive prediction errors (Friston, 2012).

These theoretical reflections all merge into the need for more task-dependent frameworks, in which specific task-demands and empirical experience are used to explain behavior. As shown in the present work and other recent studies (Laitin et al., 2019), small variations in protocols used to study action-specific effects can have a strong influence on the existence or the direction of these effects. For example, in spite of personal preferences, individuals are able to construct both allocentric and egocentric representations depending on the task to accomplish (Iglói et al., 2009). In the present study, we also showed that the positive effect of egocentric perspective preference on metric properties retrieval observed in

experiment 1 vanished when additional sensorimotor effort was applied (experiment 2), thus suggesting that the specific situation of weighted locomotion induced strategy switching towards allocentric perspective.

Taken together, these findings support the recent intentional weighting theory (Hommel, 2017). This model proposes that complex tasks imply top-down mechanisms (analogous to predictive-coding or linked with cognitive control) that can increase the saliency of features derived from empirical experience during learning. This predicts that when active navigation is used to learn spatial layouts, body-related cues could be prioritized to retrieve information because they are specific to the initial task. This could explain why distances on hill are underestimated when body-related cues are surprisingly underwhelming, but also why recalibration processes take place when additional weights are imposed, both in the way of perspective switching and distances re-evaluation.

Additionally, our results have been newly obtained in memory tasks rather than perceptual tasks, thus advocating for an embodied view on spatial representations. According to an embodied and constructivist view on spatial cognition, spatial representation could contain various layers of multimodal information, integrated into a dynamic object analogous to a “spatial collage” (Tversky, 1993, 2003). This kind of representation does not reject the traditional models of cognitive maps (Tolman, 1948) or topological graphs (Kuipers, 1978), allowing for different format and perspectives to be used from memory to subtend behavior (Franklin & Tversky, 1990). Such a multimodal representation would then use motor simulation to retrieve perceptual symbols (Barsalou, 1999) associated with action-directed components of spatial knowledge: it is possible that the motor simulation process considered in classical models of spatial categorization (Coello & Delevoye-Turrell, 2007) could account for the recalibration effect of podokinetic information observed in this study.

To sum up, the present work gathers new material for grounded views of spatial cognition, by showing that body-related information linked with active locomotion energy expenditure was implicitly computed to perceive and encode metric properties of spatial layouts. Those results support a constructionist view of multimodal, dynamic and non-isomorphic spatial representations (Tversky, 1993), which are constructed from empirical experience in an action-directed way (Franklin & Tversky, 1990; Hommel, 2017; Proffitt, 2006). They also emphasize the importance of proprioceptive prediction errors minimization

during spatial processing (Friston, 2012) to explain different directions of action-specific effects, thus advocating for task-demands centered approaches.

5.5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

- **L'altération des performances globales de rappel de positions spatiales (corrélation) observées après la navigation en pentes montantes semble liée à une altération spécifique des propriétés métriques du lieu en mémoire (précision de distances et d'angles).** Ce résultat observé d'après une tâche de mémoire nécessitant de faire appel à la représentation spatiale (ou à certaines composantes de celle-ci) suggère que les indices visuels d'effort physique implicite (tels que la pente montante ici) peuvent participer aux propriétés métriques globales de la représentation en modulant les relations topologiques entre les coordonnées des différents points de repères. Alors que nous observions une facilitation de ce type de tâche dans l'étude 1 de cette thèse, en rendant disponibles des informations podokinétiques lors de l'apprentissage (comparé à des situations statiques durant l'apprentissage), nous ajoutons ici que les caractéristiques environnementales liées à l'activité de locomotion peuvent influencer l'intégration des informations sensorimotrices dans la représentation de l'espace. En l'absence de différence d'effort physique pour les trajets montant et descendants, la simple catégorisation perceptive implicite du terrain peut moduler l'encodage de positions spatiales en mémoire.
- **La diminution des performances de rappel de positions spatiales se manifeste plus précisément par une sous-estimation généralisée de toutes les distances entre points de repères pour les trajets montants.** Il est important de préciser que cette sous-estimation des distances pré-existe pour tous types de trajets en raison de l'utilisation de la réalité virtuelle : les légères différences de contrastes, luminosité ou perspective (comparé à la réalité) suffisent à inciter les participants à sous-estimer les distances spontanément (Knapp & Loomis, 2004; Witmer & Sadowski, 1998). Cependant dans notre étude, bien que les distances encodées à partir de tous les types de trajets semblent sous-estimées, ce phénomène est significativement plus important pour les trajets montants que descendants. Ce résultat est surprenant dans le sens où il est inversé par rapport aux travaux classiques sur la perception de distances en pentes montantes : le *distance-on-hill effect* habituellement observé correspond à une surestimation des distances en pentes montantes. L'inversion de cet effet dans notre protocole pourrait résulter de la conjonction de deux éléments : le mode d'apprentissage actif et le maintien d'un effort constant en montée comme en descente. Selon les théories du *predictive coding* (Friston, 2005), des hypothèses sont formulées lors de la perception et testées par l'expérience. Or, si la pente

montante est spontanément associée à un coût énergétique plus important que la pente descendante (Proffitt, 2006), mais que le coût énergétique effectivement dépensé pour marcher sur cette pente se révèle identique au coût énergétique développé pour marcher une distance sur terrain plat, alors l'hypothèse d'un ratio sub-optimal entre coût énergétique et distance parcourue doit être réévaluée. Cette réévaluation proviendrait d'une tendance naturelle à la réduction de l'erreur proprioceptive (Friston, 2012) induite par ce protocole, et pourrait alors se caractériser par un ajustement des distances perçues à la baisse : si l'effort déployé pour gravir cette pente était moins important que prévu, c'est probablement parce que les distances étaient surévaluées dans l'hypothèse initiale découlant de la simple perception visuelle.

- Cette interprétation a été testée dans une seconde expérience, dans laquelle des poinds lestés ont été placés aux chevilles des participants. **Dans cette configuration, nous observons alors une disparition du *distance-on-hill effect* inversé : les trajets montants et descendants ne sont plus significativement différents en termes de sous-estimation globale des distances entre points de repères.** Ce résultat pourrait s'expliquer par le fait que les poids de chevilles ont permis de corriger l'erreur proprioceptive lors des trajets montants : l'effort supplémentaire alloué à la marche serait cohérent avec l'hypothèse perceptive initiale d'un coût énergétique plus important associé à la distance à gravir en pente montante. En revanche, les poids lestés n'auraient pas affecté les distances en trajets descendants. L'expérience proprioceptive issue des interactions habituelles de l'organisme avec son environnement peut modeler les processus de catégorisation spatiale (voir Coello & Delevoeye-Turrell, 2007) : il est donc possible que les trajets descendants soient sémantiquement catégorisés comme non associés à une hypothèse d'effort physique plus important. Ainsi, les poids n'ont probablement eu aucun effet sur eux puisque l'effort de marche n'est pas une donnée prioritaire lors du traitement perceptif de ce type de trajet. Les résultats de l'expérience 2 suggèrent également que lors de l'apprentissage actif d'un lieu, les informations visuelles et podokinétiques sont probablement intégrées en perception puis en mémoire avec une précision relativement fiable : dans une situation habituelle (pas de transgression de l'effort physique de marche), il est très probable que le *distance-on-hill effect* disparaisse car celui-ci pourrait être en partie causé par la situation d'observation passive classiquement utilisée dans les protocoles princeps.

- Cette étude met également en lumière des effets liés aux préférences individuelles en termes de perspectives de traitement de l'information spatiale : **alors que les performances en précision angulaire et corrélation semblent être facilitées par l'adoption privilégiée d'une perspective route (égocentrée) lors de l'expérience 1, le port de poids aux chevilles a fait disparaître cette tendance au profit d'une facilitation systématique lors de l'utilisation de la perspective survol (allocentrée)** pour toutes les mesures effectuées à partir de la tâche de positionnement de points de repères sur carte (expérience 2). Une interprétation est que le port de poids aux chevilles inciterait les participants à privilégier des stratégies liées à un format de représentation plus allocentré, ce qui pourrait notamment participer à expliquer pourquoi l'effet de la pente disparaît dans l'expérience 2. En effet, il est possible de considérer que les poids lestés ont implicitement conduit les participants à moins utiliser les informations podokinétiques pour l'intégration des propriétés métriques de la représentation spatiale : ce qui irait dans le sens d'un argument pour l'utilisation sélective des informations podokinétiques en fonction de la pertinence de celles-ci. Lorsqu'une distorsion des informations podokinétiques est ressentie (par l'utilisation de poids, ou par la fatigue etc.), les participants seraient alors capables de basculer vers une perspective alternative de leur représentation multimodale (par exemple la perspective allocentrée, voir Iglói et al., 2009). Ceci semble cohérent avec les observations de Brunyé et al. (2010), qui ont postulé que l'adoption d'une perspective route favorise l'utilisation des informations sensorimotrices lors du traitement de l'information spatiale (hypothétiquement par le biais de la simulation sensorimotrice), alors que la perspective survol ne semble pas impliquer l'utilisation des informations podokinétiques : ainsi la perspective route dépendante des informations podokinétiques devrait être évitée au profit d'une perspective allocentrée moins perméable aux biais d'effort podokinétiques.

6. ETUDE 4 : LES INTERACTIONS DANS L'ESPACE PERI-PERSONNEL ENTRAINENT DES BIAIS D'ENCODAGE DES PROPRIETES METRIQUES LIES A LA CAPACITE D'ACTION

6.1. OBJECTIFS

Les trois études précédentes de la thèse ont permis de préciser le rôle des informations sensorimotrices en lien avec l'activité de marche (informations podokinétiques) dans la construction des propriétés métriques de la représentation spatiale. Nous avons notamment pu observer des effets liés à l'anticipation de coûts énergétiques de la marche non observés jusqu'à maintenant dans le contexte de la mémoire et des propriétés de la représentation spatiale (étude 2 et 3). Ces effets sont des arguments en faveur d'une vision écologique de la mémoire spatiale, dans laquelle le terrain (qui « afforde » la locomotion lors de la perception visuelle) et les distances qui le composent sont automatiquement intégrés dans la représentation spatiale en conjonction avec les informations podokinétiques. Ces informations podokinétiques pourraient moduler ainsi la précision des positions récupérées depuis la mémoire (étude 1), et par l'inférence implicite de coûts énergétiques liés à la marche pourraient déformer le rappel de positions et de distances (étude 2 et 3), en accord avec une vision dirigée vers l'action de la cognition (voir Coello & Delevoye-Turrell, 2007; Proffitt, 2006, pour la catégorisation spatiale, Tversky, 2009, pour la mémoire spatiale et Barsalou, 2008, pour une approche globale de l'ensemble de la cognition).

Ces études considèrent un type d'information sensorimotrice pouvant intervenir dans la construction de représentations spatiales : les informations pokokinétiques en lien avec la locomotion. Or, si les effets de la locomotion sur les propriétés métriques de la représentation spatiale reflètent des mécanismes dirigés vers l'action en mémoire (Glenberg, 1997), il est possible que ce type d'effet existe pour d'autres types d'interaction avec l'environnement. Il semble donc important de tester l'hypothèse d'une généralisation des effets liés à l'action en mémoire spatiale sur d'autres types d'interactions. Parmi les interactions possibles autres que la locomotion, nous disposons d'un grand nombre d'arguments nous permettant de penser que les jugements de manipulabilité ou d'accessibilité des objets contenus dans l'espace péripersonnel déforment la perception des distances immédiates (voir p. 106). Globalement, il

apparaît que les capacités d'action liées à certaines caractéristiques morphologiques modulent la perception de l'espace immédiat (Fajen, 2005) : il a par exemple été proposé que la longueur du bras constitue une échelle de référence pour estimer des distances péripersonnelles (Longo & Lourenco, 2007).

Ces effets de la manipulabilité liée à l'action de saisie ont surtout été étudiés dans le cadre de la perception, mais quelques travaux permettent de penser que la manipulabilité intervient également dans les représentations de l'espace en mémoire. Par exemple, il est plus rapide de récupérer des positions spatiales depuis la mémoire lorsque les éléments en question sont disposés sur des axes favorisant l'action motrice (Franklin & Tversky, 1990). De plus, les objets mémorisés comme proches de la position du corps sont rappelés plus rapidement que les objets éloignés (Glenberg et al., 1987; Morrow et al., 1987). Enfin, le rappel de positions spatiales extrapersonnelles depuis une perspective égocentrée semble pré-activer des représentations motrices latéralisées (Wang et al., 2012), et peut également s'accompagner de gestuelle spontanée (Hostetter & Alibali, 2008; Jamalain et al., 2013) facilitant les performances (Goldin-Meadow & Beilock, 2010; Kang & Tversky, 2016). Il semble donc que des représentations sensorimotrices associées à l'activité des membres supérieurs (et en particulier concernant la manipulabilité ou l'accessibilité des objets) soient impliquées dans la perception et la récupération de l'information spatiale.

Puisque la manipulabilité et les comportements de saisie associés intègrent des informations sensorimotrices recueillies par l'interaction avec l'environnement, il serait intéressant de regarder dans quelle mesure ils interviennent dans les propriétés métriques des représentations spatiales. A notre connaissance, aucune étude ne s'est encore explicitement intéressée à la façon dont les interactions avec des objets contenues dans l'espace péripersonnel modifient les propriétés métriques de la représentation spatiale. Or, si le corps constitue l'axe de référence privilégié pour les représentations de l'espace (Franklin & Tversky, 1990; Poincaré, 1914) et que les jugements de capacité d'action influencent la perception des distances (Linkenauger et al., 2009), alors les actions effectuées lors de l'apprentissage spatial devraient influencer les propriétés métriques de la représentation. Suivant l'idée selon laquelle les distances seraient encodées en fonction des capacités d'action en mémoire (Dutriaux & Gyselinck, 2016a; Zwaan & Radvansky, 1998), le but de l'étude 4 sera de déterminer si la manipulation d'objets durant l'apprentissage spatial module les performances lors d'une tâche de rappel de positions spatiales.

Pour ce faire, nous utilisons ici un protocole d'apprentissage inspiré de la méthode des lieux (voir p. 23) dans lequel les participants doivent naviguer dans un lieu fermé composé de plusieurs pièces, chaque pièce contenant un certain nombre d'objets à mémoriser. Chaque objet est associé à une position spatiale, que les participants doivent rappeler lors de la phase test. Afin d'isoler l'effet de l'interaction motrice sur la mémoire de l'espace, les participants doivent réaliser une action mettant en lien l'objet et sa localisation spatiale (ou ne pas réaliser d'action) lors de l'apprentissage. Notre hypothèse est que les participants ayant manipulé les items lors de l'apprentissage vont montrer des performances dégradées par rapport au groupe n'ayant pas manipulé les items. Cette hypothèse est fondée sur les observations montrant que les distances contenues dans les limites des capacités d'actions en lien avec la saisie d'objets sont sous-estimées (p. ex. Witt et al., 2005). Si cette sous-estimation est liée à la possibilité d'interagir ou à l'interaction directe avec les objets qui conduit à penser que l'objet est près de soi puisqu'il est possible de le manipuler, alors il est possible que ce biais de manipulabilité soit également maintenu dans la représentation spatiale. Ainsi nous nous attendons à une déformation des performances spatiales pour les participants ayant physiquement interagi avec les objets lors de l'apprentissage, dans le sens d'une sous-estimation globale des distances rappelées.

De plus, puisque les concepts liés à des objets manipulables semblent être associés à des représentations motrices en mémoire (Bub et al., 2008; Tucker & Ellis, 2004), la moitié des items utilisés dans cette étude sont des objets manipulables (sémantiquement associés à une action motrice de saisie) et l'autre moitié est composée d'objets non manipulables. Notre hypothèse est que la déformation des propriétés métriques causée par l'interaction motrice devrait être d'autant plus importante pour les objets manipulables que pour les objets non manipulables, puisque les objets manipulables pré activent des représentations motrices pouvant elles-mêmes influencer les jugements d'accessibilité.

Enfin, cette dernière étude servira à rassembler de nouveaux éléments permettant de préciser le rôle de la simulation motrice dans le rappel de l'information spatiale : si la perception des objets implique la simulation motrice de l'acte de saisie (Linkenauger et al., 2009), il est tout à fait possible que ce mécanisme de simulation soit également utilisé lors du rappel de la position spatiale. Or, observer une déformation des propriétés métriques plus importante pour les participants ayant manipulé les items devrait fournir un argument

Etude 4 : les interactions dans l'espace péri-personnel entraînent des biais d'encodage des propriétés métriques liés à la capacité d'action

supplémentaire suggérant que la reviviscence de l'acte de saisie (associée à l'accessibilité de l'objet en mémoire) ait été favorisée pour les participants ayant manipulé les items.

6.2. ARTICLE 4

“Close to me”: interacting with objects biases metric properties of extrapersonal spatial representations

Simon Lhuillier^a, Valérie Gyselinck^b, Léo Dutriaux^c, Pascale Piolino^a, & Serge Nicolas^a.

^a *Université de Paris, Laboratoire Mémoire, Cerveau et Cognition, Paris, France*

^b *Université de Paris, Laboratoire de Psychologie et Ergonomie Appliquées, IFSTTAR, Versailles, France*

^c *University of Glasgow, Glasgow, United Kingdom*

ABSTRACT

Goal directed approaches on perception usually consider visual perception as an automatic categorization process aiming to extract action possibilities from the environment. In relation to spatial processing, this implies that distance perception could be shaped by the body and its potential for interaction. For example, a large number of studies showed that reachability could affect peripersonal distances perception, leading authors to postulate that object perception automatically elicit motor simulation to anticipate the feasibility of a reaching action (Linkenauger et al., 2009). Although these effects have been largely investigated in the field of perception, very little is known about the effect of motor interactions in spatial memory: is goal-directed perception of objects in the peripersonal space responsible for some distortions in the spatial representation of the global extrapersonal space? In order to investigate this question, we designed an immersive virtual reality environment in which participants had to learn the positions of several items (images of objects or animals). Half of the participants had to physically grab the item with their hand and drop them at specified locations (active condition). The other half of the participants simply saw the items appearing at the specified position without ever having to interact with them (passive condition). As action related concepts seem to cue motor simulation processes (Bub et al., 2008; Tucker & Ellis, 2004), half of the items used during spatial positions learning were images of manipulable objects, and the other half were non manipulable objects. After having positioned all the items, participants were asked to draw a map of the virtual environment from memory, and to position all the items where they saw them during the learning phase. Results show that active participants underestimated all distances between items during spatial recall compared to passive participants. Moreover, interaction analysis suggests that distances between manipulable objects were globally underestimated for active participants but not distances between nonmanipulable objects, and that this effect did not occur for passive participants. These results are discussed according to grounded approaches of spatial cognition, emphasizing on motor simulation as a possible mechanism for position retrieval from memory.

KEYWORDS: *motor interaction, manipulability, spatial representation, simulation*

6.2.1. Introduction

6.2.1.1. *Goal-directed perception and cognition*

According to ecological approaches of perception, the world is perceived as a collection of action possibilities (Gibson, 1979). This goal-directed view influenced many aspects of grounded theories of cognition, that make the assumption that cognition is understood in interaction with environmental contexts (Barsalou & Wiemer-Hastings, 2005), and embodied into bodily states (Gibbs, 2006) and situated actions (Gärling & Golledge, 1989). Grounded conceptions generally postulate that concepts are encoded from modal experience to long-term memory under the form of perceptual symbols (Barsalou, 1999), that can be retrieved using simulation. As defined by Barsalou (2008), simulation is “the reenactment of perceptual, motor, and introspective states acquired during experience with the world, body and mind”. Simulation processes have received much empirical evidence with the discovery of mirror neurons during action observation (Decety & Grèzes, 2006; Gallese et al., 1996) and the study of mental imagery processes (see Kosslyn, Thompson, & Ganis, 2006 for a review). Focusing on memory, it has been demonstrated that action-related concepts produce an analogous activity of the corresponding actions in motor cortex (Chao & Martin, 2000; Martin, 2007), thus introducing a specific type of simulation commonly referred to as motor simulation.

Motor simulation can be seen as evidence that perceptual symbols encoded in memory are embodied in bodily states and goal-directed actions. This phenomenon has been largely studied using a stimulus-response compatibility paradigm: Glenberg and Kaschak (2002) showed that directional actions implied by a sentence could be facilitated with the execution of actual actions to perform during a simple decision task (e.g: “open the drawer” elicit shorter responses when the correct answer requires to move the hand towards the body to push a button rather than in the opposite direction). Along the same line, Tucker & Ellis (2004) observed that this compatibility effect could also concern the type of motor responses, as power grip responses were faster for objects that imply this type of grip, but slower for objects that imply precision grip (and conversely for objects that imply precision grip responses). Taken as a whole, stimulus-response compatibility studies assessed that reading or viewing action-related sentences/objects automatically primes corresponding motor schemes (Bub et al., 2008; Flumini, Barca, Borghi, & Pezzulo, 2015). Additionally, body postures can interfere with motor simulation, as shown by Dutriaux & Gyselinck (2016): adopting a

constrained posture (hands crossed behind the back) while learning a list of objects negatively impacts retrieval performances for manipulable objects but not for non manipulable objects, whether presented as images or words. This interfering effect of posture seems to depend on the presence of an action context, as memory for sentences that contain attentional verbs along with manipulable objects (e.g: “see a cup”) are not affected by the interfering posture whereas it was observed with action verbs (Dutriaux, Dahiez, & Gyselinck, 2018).

These results are consistent with the idea that not only perception is goal-directed (Gibson, 1979), but representations in memory aim to support action (Glenberg, 1997) by using motor simulation as an automatic retrieval mechanism (Versace et al., 2014). Among all possible types of representations, the present work will specifically focus on spatial representations.

6.2.1.2. *Embodied spatial cognition: different spaces, different actions*

Research in spatial cognition gathers information about how individuals apprehend and build knowledge about the space that surrounds them. As spatial knowledge is derived from sensory and locomotor experiences, most empirical research on this subject is biased towards people’s behavior rather than space itself, thus taking spatial context as a “venue for action” (Denis, 2018; Gärling & Golledge, 1989). In that respect, grounded theories of cognition are perfectly fitted to conceptualize spatial representations, describing them as shaped by the body and its potential for action in relation with the environment (Franklin & Tversky, 1990; Tversky, 1993, 2003). Yet, it is not clear how actions and motor simulation can participate to the retrieval of spatial representations. It has been notably hypothesized that the value of action in spatial memory depends on the scale of the space to consider: for example, different taxonomies of spaces emphasize the functional differences between peripersonal and extrapersonal spaces (Montello, 1993; Previc, 1998; Tversky, 2003).

This dichotomy seems quite intuitive and mainly focus on the degree of immediate motor interactions between the body and the environment (Coventry, 2012): the peripersonal space is for instance *the space around the body* (Tversky, 2003, 2005) where body specific perception linked with action possibilities take place. Evidences of action-directed perceptual processing of peripersonal spaces are numerous, and can be found in regards to a specific parameter of spatial cognition, namely distance perception. For example, the distance between

the body and an unreachable object is significantly underestimated if participants are provided with a reach-extending tool (Witt et al., 2005). This type of action ability effect has been observed with body characteristics: individuals with narrow shoulders perceive larger door apertures widths compared to individuals with large shoulders (Stefanucci & Geuss, 2009). More interestingly, Longo & Lourenco (2007) observed a systematic relation between the estimated extent of the peripersonal space and arm length, suggesting that arm length could be used as a reference scale for immediate distances. In addition, the distance between the body and a tool is judged closer if the handle is directly reachable, compared to when the handle is oriented such as individuals need to twist the arm to reach it (Linkenauger et al., 2009). Converging results thus led Linkenauger et al. to propose that motor simulation is automatically used during spatial perception to anticipate actions, and that the outcome of the simulation can influence perceived distances according to action capabilities (Witt & Proffitt, 2008). Nonetheless, these results are the subject of much controversy as some authors advocated that they were not related with actual perceptual effects, but with judgment biases such as complying with experimental demands (Firestone & Scholl, 2016). We propose that this criticism could be addressed by observing action-directed effects linked with motor simulation not during explicit perception, but during the implicit retrieval of distances, from spatial representations encoded in memory.

According to a constructivist view on spatial memory, spatial representations can be described as “thematic overlays of multimedia information” integrated from different perspectives or extents, in a fragmented, dynamic, and multimodal object (Tversky, 1993, 2003). Referring to this definition, one could hypothesize that if motor simulation is involved during peripersonal spatial processing, it would be integrated along with broader scales into the spatial representation. Yet very little is known about the interaction between peripersonal action-directed processes and global memorization of extrapersonal spaces containing the body.

Therefore, the aim of the present work is to address the following question: is motor simulation linked with peripersonal actions involved in the memory of extrapersonal spaces? In order to reach this goal, we propose a new methodology to study action-directed spatial memory using immersive virtual reality and very sensible geometrical analysis of coordinate's retrieval on maps (instead of subjective judgments). We emit the general hypothesis that motor simulations of interactions with objects may induce biases in the

Etude 4 : les interactions dans l'espace péri-personnel entraînent des biais d'encodage des propriétés métriques liés à la capacité d'action

memory of extrapersonal metric properties. We will compare spatial learning of objects coordinates by contrasting two learning conditions: an “active” condition in which individuals will directly manipulate items by grabbing and dropping them to specific locations, and a “passive” condition in which participants only see items appearing at specific locations (but do not physically interact with them). If reachability influences motor simulation, and if motor simulation outcomes can influence distance perception (Witt & Proffitt, 2008), we expect participants in the active condition to significantly underestimate distances compared to passive participants. The memory of metric properties will be observed for manipulable objects (such as tools) and non manipulable objects. Along with the idea that manipulable objects integrate and prime action possibilities in their semantic representations (Dutriaux & Gyselinck, 2016), we expect them to be recalled as closer to the body during spatial retrieval than non manipulable objects, and that this effect will be stronger for active participants (as motor simulation has not been cued for passive participants).

6.2.2. Méthode

6.2.2.1. Participants

Thirty undergraduate students enrolled in Psychology from the Paris Descartes University ($\varphi = 20$) took part in this study in exchange for course credit ($\bar{M}_{age} = 23.37$ years $SD_{age} = 5.28$ years). All participants were required to have normal or corrected to normal vision, and to never have suffered from epilepsy. None of them reported having experienced symptoms of motion sickness due to virtual reality material prior, during and after the experiment. All participants signed written informed consent. They were randomly assigned to one of the two independent conditions (Active group = 15 participants, Passive group = 15 participants). For groups matching information, *see Table 1*.

Table 1
Mean and t tests for group matching (SD in brackets).

Demographic information & Habits Questionnaire												
	Age (Years)	Height (cm)	Weight (kg)	Sport Practice (hours per week)	Walk Time (minutes per day)	Video-Games Time (hours per week)	Previous Experience With HMD (from 0 to 1)	Motion Sickness Frequency (from 0 to 3)	Global Estimated Difficulty of the Task (from 0 to 3)	Estimated Cognitive Difficulty (from 0 to 3)	Estimated Physical Difficulty (from 0 to 3)	Global Satisfaction about Performances
Active Condition	22.8 (4.51)	168.3 (9.05)	59.33 (10.52)	1.73 (1.8)	46.33 (26.81)	0.93 (1.08)	0.47 (0.51)	0.73 (0.78)	0.2 (0.41)	0.60 (0.72)	0.13 (0.51)	1.73 (0.69)
Passive Condition	23.93 (5.98)	170.73 (7.04)	69.37 (15.51)	2.7 (2.75)	69 (39.71)	1.2 (1.24)	0.67 (0.48)	0.93 (0.69)	0.27 (0.45)	0.67 (0.71)	0.07 (0.25)	2.20 (0.66)
t test value (p.value)	-0.83 (.41)	-1.15 (.26)	-2.93 (.005)	-0.51 (.61)	-2.59 (.01)	-0.89 (.38)	-1.57 (.12)	-1.05 (.29)	-0.6 (.53)	-0.36 (.72)	0.64 (.52)	-2.67 (.01)

6.2.2.2. *Material*

Virtual environment and virtual reality apparatus A realistically scaled virtual interior house (ground surface = approximately 30×30 m) was created for the needs of this study using Unity Software v.2017.3.0f3 (<https://unity3d.com/>). Five different rooms and one corridor were designed using easily recognizable furniture and texture for participants not to confuse them (see Figure 35 for a map and examples of visual scenes from the participant's perspective). The environment was designed to be used with a HTC Vive head-mounted display and controllers (<https://www.vive.com/>) and navigation was possible by actual walking for short distances (in 3×3 m area) and using the Steam VR teleport plugin for longer distances (<https://assetstore.unity.com/packages/tools/integration/steamvr-plugin-32647>).



Figure 35 – Left: Photos of various locations within the virtual environment, taken from the participants' perspective. Right: Map of the virtual environment with names of the five rooms

Images Stimuli used for this study were high resolution (2000×2000 pixels) color pictures of 8 manipulable objects and 8 nonmanipulable objects presented on a white background. Manipulable objects were frequently handled objects such as tools. Every manipulable object chosen for this study had a grip implying the use of power grabbing (e.g., hammer, watering can). Nonmanipulable objects were non-frequently handled objects of various sizes (e.g. boat, lighthouse, dragonfly...). All objects were chosen from a standardized database (Lagacé, Downing-Doucet, & Guérard, 2012). Objective frequency has been controlled using the LEXIQUE online database (<http://www.lexique.org/>; New, Pallier, Brysbaert, & Ferrand, 2004) to assess that manipulable and nonmanipulable objects did not differ ($t_{(16)} = -.49, p. = .62$). All images were displayed in the virtual environment using a

symbolic format (images floating in transparent spheres, diameter = 30 cm) and not using 3D objects, in order to avoid action priming by the 3D object itself (see Figure 36).



Figure 36 - Example of an image in the virtual environment

Item spatial position retrieval task A pencil and paper item position retrieval task was used in order to collect information about metric properties of the spatial representation derived from item position learning. It consisted of a sheet of paper (A4 format) where a black rectangle (15×11 cm) was printed in the center for participants to draw a map of the virtual environment. All around the rectangle, all the names of the images were written in a random order and arrangement, so that participants could be tested only on the spatial positioning in the map, and not on images retrieval.

Questionnaires Two questionnaires were used in this study in order to gather information about participants' characteristics. The first questionnaire was a habits questionnaire created for the study. It was composed by eight items on a four points scale (from "Not at all/Never" to "Absolutely/Always") and four items allowing open numeric responses (e.g., "How many hours a week do you spend on sports/exercising"). The aim was to collect individual information about the frequency of physical activities/video-games usage, and information about the task performed during the experiment: motion-sickness experience, cognitive and physical perceived difficulty, and global satisfaction about the performance. The other questionnaire was the second version of the Vividness of Movement Imagery Questionnaire (VMIQ; Roberts, Callow, Hardy, Markland, & Bringer, 2008). This instrument allows participants to evaluate their own movement imagery abilities by mentally performing actions and rating how vivid/precise their mental image of this action is. Twelve

different items/actions are used in this questionnaire (e.g., “Kick a ball in the air with the foot”), each one of them has to be rated on a five points scale (one being “Perfectly vivid image, as precise as a real perception”, and five being “No image at all, you just know that you can think about it”). Each rating has to be given for three different perspectives: internal movement imagery (“see through your own eyes while performing the action”), external movement imagery (“look at yourself from outside of your body while performing the action”), and kinesthetic imagery (“feel the body-related sensations while performing the action”). This questionnaire thus provides three scores (one for each perspective) that can vary between twelve (highest possible self-estimated abilities) and sixty (lowest possible self-estimated abilities). For psychometric qualities of this questionnaire, see Roberts et al. (2008).

6.2.2.3. Design and Procedure

Each participant was randomly assigned to one of the two independent groups (Active group or Passive group) and was tested individually for 30 minutes approximately. After they had been asked to communicate their socio-demographic information and signed the consent form, participants were equipped with the head-mounted display and the controllers. They then started the experiment by a training phase during which they had to train teleporting through the environment, as well as learn the general layout of the rooms. When participants began to feel familiar with the apparatus and the environment, the experimenter asked them to perform a simple route planning task in order to verify that they knew the locations of the different rooms (e.g., “go to the bedroom, then go back in front of the living room television”). Participants were then asked to go back to their starting position (in the middle of the entrance) in order to begin the learning phase. Instructions for the learning phase were given orally. If the participant was previously assigned to the active group, instructions were to find targets that appear at a specific location in the environment: once a target is located, participants had to get close to it until an item (an image in a floating bubble) appeared in front of their eyes. They then had to take the item in their hands using the controller (by pushing the trigger when they wanted to grab the bubble), and put it down at the exact location of the target. When an item was positioned, the target disappeared to reappear in another location, in order to repeat this process with another item. They were asked to memorize all the images/items with their respective positions. Participants in the passive group underwent the same procedure and instructions, with the only difference that items appeared already positioned to their target location when they approached close enough to the

target, so that they didn't have to grab and drop items through pushing and releasing the trigger. Once participants understood the task, the experimenter started the protocol by triggering the first target position. No time limit was imposed for the learning phase. Active and passive participants both saw all sixteen items and positions, half of the items being manipulable objects and the other half being nonmanipulable objects. Targets and associated items appeared one at the time, and participants were asked not to go back to previous items. Target locations and order of locations were always the same (*see Figure 37* for a map of these locations with appearance order; *see Figure 38* for an example of the spatial target as seen by participants). Assignment of the items to positions was pseudo-randomized: three order lists were created to control for serial effects across manipulable and nonmanipulable items, but also to make sure that no clusters of several items of the same type were randomly created and placed contiguously. Participants were randomly assigned to one of those lists for the learning phase. After the sixteen items have been positioned, the experimenter announced the end of the learning phase and removed the apparatus from the participant's head. Then, participants were asked to sit down at a table and fill the habits questionnaire, which served also as an interfering task, preventing verbal repetition strategies. Afterwards, participants were asked to write down as many items as possible in a free recall task. Time limit was two minutes and they were free to recall items in any order (only items, not positions). They were then presented with the item position retrieval task, in which instructions were to draw a simple map of the house (only walls were required) in the central rectangle in order to locate each item on the map at the exact position they were during the learning phase. All items had to be placed to complete this task. Time limit was seven minutes. Lastly, participants completed the VMIQ.

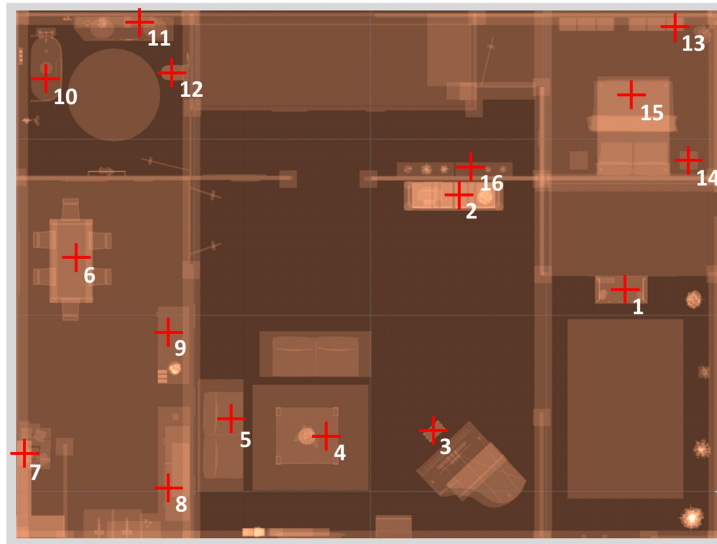


Figure 37 - Positions and order of the items during the learning phase

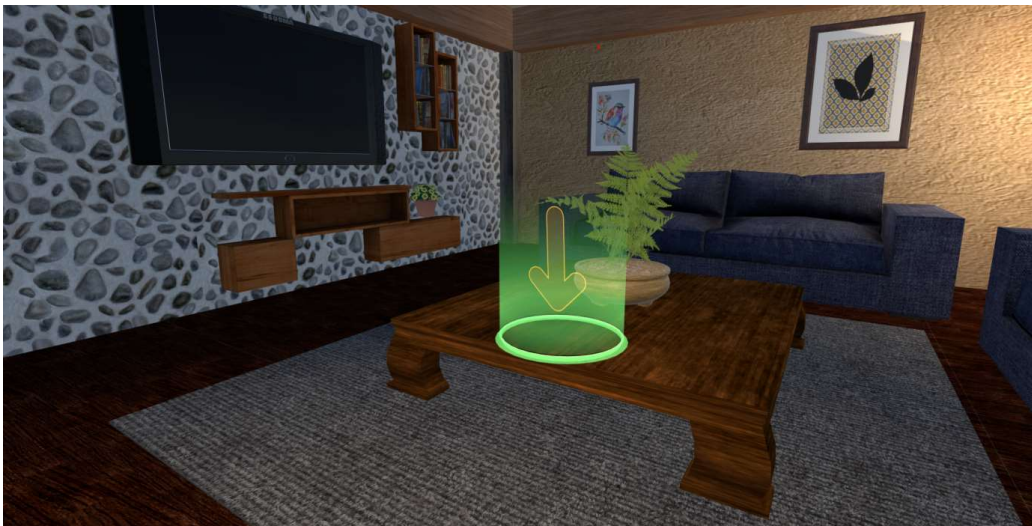


Figure 38 - Example of a spatial position in the virtual environment, as indicated for participants in both active and passive conditions

6.2.3. Résultats

Measures Item spatial position retrieval task performances were analyzed using the GMDA software (Gardony et al., 2016), which allows to perform geometric analysis of map drawings and coordinates positioning. The software performs pairwise comparisons between spatial positions of items drawn by participants on the map (see Figure 39 for an example) and actual positions of the items on the reference map. This yields binomial measures among which we chose three dependent variables to analyze: *angle accuracy*, *distance accuracy* and *scale*. *Angle accuracy* compares two by two inter-items angular errors

(compared to reference map) to provide an indicator of global magnitude of angular errors (ranging from 0 to 1, higher scores meaning higher fidelity with the reference map). *Distance accuracy* performs the exact same analysis than angle accuracy, but using the magnitude of distance errors instead of angular errors (similarly ranged from 0 to 1). Finally, *scale* is used to better describe distance accuracy as it computes the global direction of distance errors. This indicator is ranged from -1 to 1, lower scores reflecting global compression of the retrieved spatial layout compared with the reference map (= global underestimation of distances). Conversely, higher scores reflect global expansion of the spatial layout (= global overestimation of distances), zero meaning perfect retrieval of the proportional distance scale.

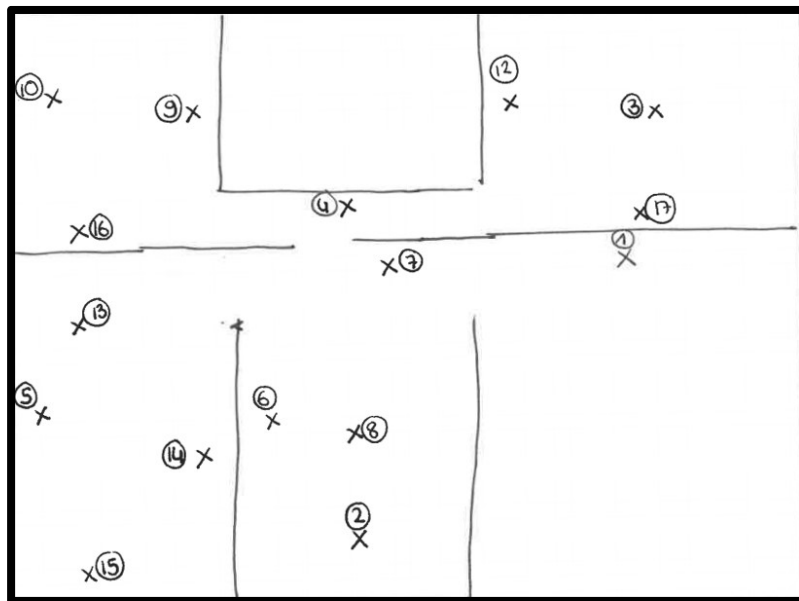


Figure 39 - Example of a map drawn by a participant during the item positions retrieval task

Statistical Analyses All analyses were conducted using R software version 3.4.0 (R Development Core Team, 2017). Mixed linear regression models were used because of their superiority over traditional repeated measures ANOVAs at properly describing investigated effects (Kristensen & Hansen, 2004). Bayesian inference was used on mixed models because of its particular relevance in the field of cognitive sciences, as it can provide better accuracy in small data samples and do not assume data normality (Kruschke, 2010; Makowski, 2018). Bayesian mixed linear regression models were fitted using the *rstanarm* package (Goodrich, Gabry, Ali, & Brilleman, 2018) and described using the *bayestestR* package (Makowski, Ben-Shachar, & Lüdtke, 2019). All mixed models used motor activity condition (comparing active to passive condition) and object manipulability (comparing manipulable to non-manipulable items) as fixed effects factors, as well as the interaction between these two

predictors. Random intercepts were entered for the participants in order to account for inter-individual variability. As visual and motor simulation have been shown to be involved during spatial processing (Brunyé, Mahoney, & Taylor, 2010, for example) we also chose to enter random intercepts for visual and motor imagery vividness obtained with the VMIQ (Internal, external and kinesthetic sub-scales), in order to account for individual differences in imagery strategies and/or abilities. This analysis protocol was strictly repeated for analyzing four different measures: free recall, and *angle accuracy*, *distance accuracy*, and *scale* indicators computed with the GMDA software from the item spatial position retrieval task performances on maps (see the “*Measures*” part). Bayesian inference was done using a Markov Chain Monte Carlo sampling procedure to draw posterior distributions. Following the reporting guidelines (Makowski et al., 2019), each parameter of each model will be described using relevant indicators of the characteristics of posterior distributions derived from sampling: the median and its 89% confidence interval, the probability of detection (*pd*) and the region of practical equivalence percentage (*ROPE*). The *pd* is interpreted as an indicator of existence and consistency of the direction of a parameter. Its values are very reminiscent of the frequentist two-sided *p.value* following the formula $p.value = 2 * (1 - \frac{pd}{100})$. Hence, a probability of detection of 97% describes an effect that is likely to exist in the same direction as the one observed from the data (approximately corresponding to a *p.value* of .05 in frequentist terms), and a 99.99% *pd* describes a certainly existent effect (Makowski et al., 2019). The *ROPE* refers to an interval in which all values are practically equivalent to a null effect. Thus, *ROPE* percentage refers to the proportion of the posterior distribution included in this region. *ROPE* percentage is an indicator of significance, which means that the null hypothesis can be rejected when less than 1% of the posterior distribution is the *ROPE* (2.5% in *ROPE* being considered as a “probably significant” effect).

Free recall Motor activity condition predicted a probability of 99.13% (*pd*) of being positive (Median_{condition} = 1.38, CI_{89%} = [0.44, 2.27]). The first level of our analysis being “active condition”, this means that motor activity had a negative effect on free items retrieval such as passive participants retrieved more words than active participants ($\bar{M}_{passive} = 11.87$, SD_{passive} = 3.11 ; $\bar{M}_{active} = 9.33$, SD_{active} = 1.98, see *Figure 40*). This parameter can be considered as significant (0% in *ROPE*). Item manipulability did not yielded any significant parameter (*pd* = 94.93% < 95%, Median_{condition} = 0.78, CI_{89%} = [0.047, 1.604], 4.63% in *ROPE* > 2.5%), which means that participants did not significantly retrieved more non-

Etude 4 : les interactions dans l'espace péri-personnel entraînent des biais d'encodage des propriétés métriques liés à la capacité d'action

manipulable words than non-manipulable words ($\bar{M}_{non-manipulable} = 5.93$, $SD_{non-manipulable} = 1.67$; $\bar{M}_{manipulable} = 4.67$, $SD_{manipulable} = 1.71$). The motor condition effect did not interact with item manipulability as the parameter for the interaction effect was not significant ($pd = 63.5\% < 95\%$, $Median_{condition:manipulability} = -0.23$, $CI_{89\%} = [-1.39, 0.81]$, 21.71% in *ROPE* $> 2.5\%$).

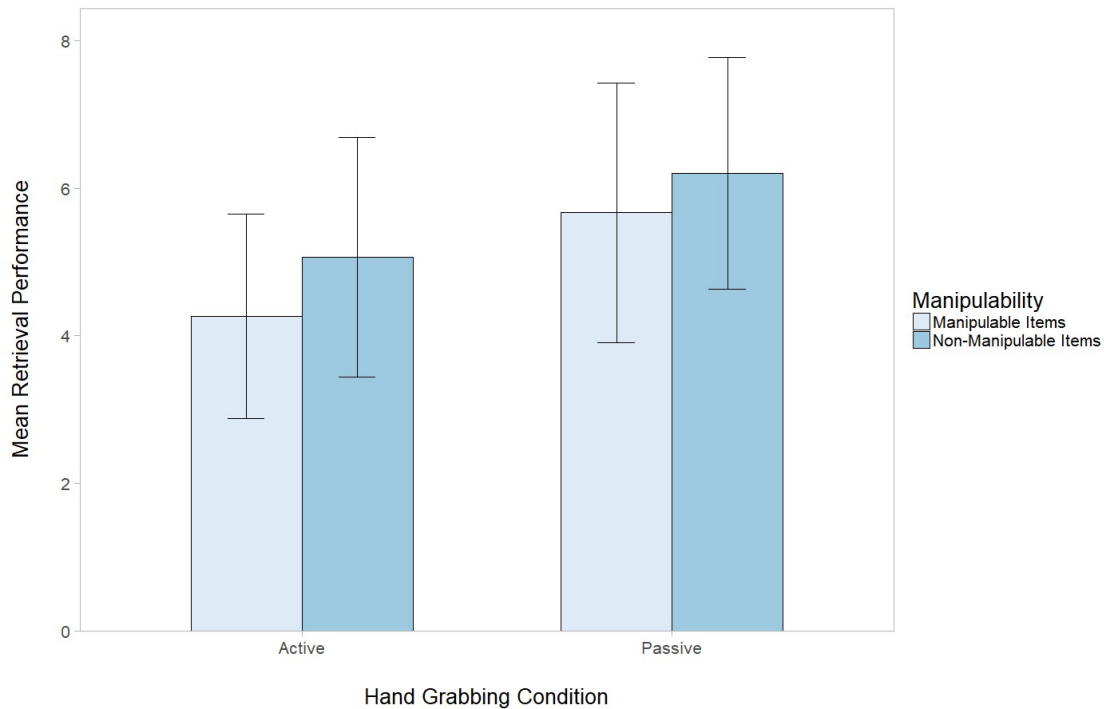


Figure 40 - Mean free recall retrieval performances as a function of motor activity and objects manipulability (error bars are standard errors)

Distance Accuracy An effect of motor activity condition was observed for distance accuracy, which parameter had a probability of 99.98% (pd) of being positive ($Median_{condition} = 0.104$, $CI_{89\%} = [0.059, 0.157]$). This parameter can be considered as significant (0% in *ROPE*). The first level of our analysis being “active condition”, this means that motor activity had a negative effect on distance accuracy such as passive participants were more accurate to retrieve distances magnitude between items during map drawing than active participants ($\bar{M}_{passive} = 0.88$, $SD_{passive} = 0.09$; $\bar{M}_{active} = 0.79$, $SD_{active} = 0.07$, see *Figure 41*). Item manipulability effect had a probability of 98.3% (pd) of being positive ($Median_{condition} = 0.037$, $CI_{89\%} = [0.009, 0.066]$) and can be considered as significant (0% in *ROPE*), which means that distances between non-manipulable items were more accurately retrieved than distances between manipulable items ($\bar{M}_{non-manipulable} = 0.85$, $SD_{non-manipulable} = 0.07$; $\bar{M}_{manipulable} = 0.83$, $SD_{manipulable} = 0.08$, see *Figure 41*). Interaction parameter yielded no significant effect

Etude 4 : les interactions dans l'espace péri-personnel entraînent des biais d'encodage des propriétés métriques liés à la capacité d'action

($pd = 91.88\% < 95\%$, $\text{Median}_{\text{condition:manipulability}} = -0.034$, $\text{CI}_{89\%} = [-0.076, 0.005]$, 10.45% in $\text{ROPE} > 2.5\%$).

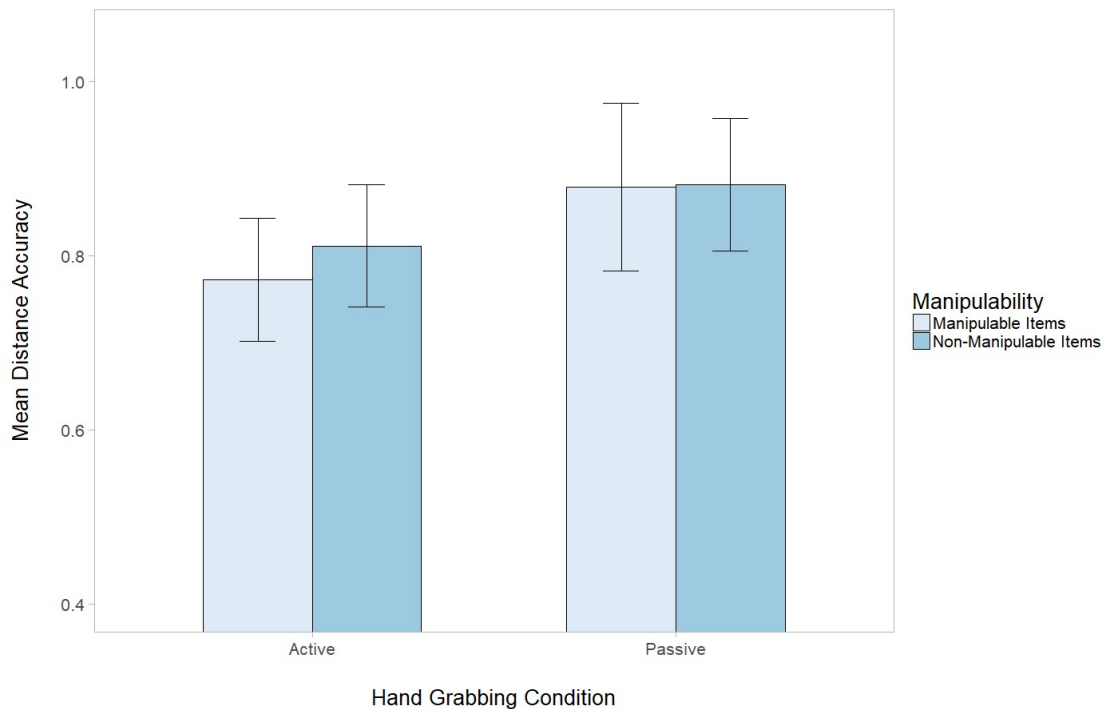


Figure 41 - Mean distance accuracy in the items position retrieval task as a function of motor activity and objects manipulability (error bars are standard errors)

Angle Accuracy Angular accuracy was predicted by motor activity condition, which parameter had a probability of 99.3% of being positive ($\text{Median}_{\text{condition}} = 0.13$, $\text{CI}_{89\%} = [0.045, 0.207]$). This parameter can be considered as significant (0% in ROPE). The first level of our analysis being “active condition”, this means that motor activity had a negative effect on angular accuracy such as passive participants were more accurate to retrieve angles magnitude between items compared to active participants ($\bar{M}_{\text{passive}} = 0.85$, $\text{SD}_{\text{passive}} = 0.14$; $\bar{M}_{\text{active}} = 0.74$, $\text{SD}_{\text{active}} = 0.12$, see *Figure 42*). Item manipulability did not yielded any significant parameter ($pd = 93.05\% < 95\%$, $\text{Median}_{\text{manipulability}} = 0.042$, $\text{CI}_{89\%} = [-0.003, 0.088]$, 12.3% in $\text{ROPE} > 2.5\%$), and neither did the interaction parameter ($pd = 64.7\% < 95\%$, $\text{Median}_{\text{condition:manipulability}} = -0.015$, $\text{CI}_{89\%} = [-0.077, 0.052]$, 28.3% in ROPE).

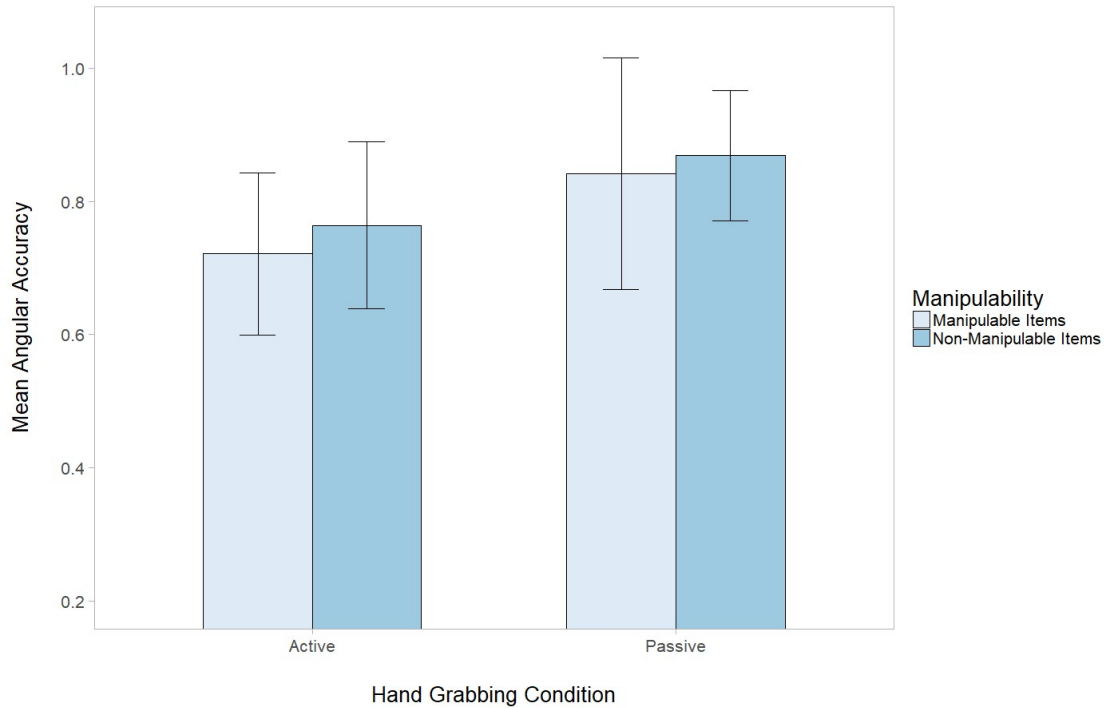


Figure 42 - Mean angle accuracy in the items position retrieval task as a function of motor activity and objects manipulability (error bars are standard errors)

Scale Motor activity condition showed a probability of 99.98% of yielding a positive effect ($\text{Median}_{\text{condition}} = 0.32$, $\text{CI}_{89\%} = [0.18, 0.45]$). This parameter can be considered as significant (0% in *ROPE*). The first level of our analysis being “active condition”, this means that motor activity had a negative effect on angular accuracy such as active participants significantly underestimated all distances between items during map drawing more than passive participants ($\bar{M}_{\text{active}} = 0.61$, $\text{SD}_{\text{active}} = 0.24$; $\bar{M}_{\text{passive}} = 0.85$, $\text{SD}_{\text{passive}} = 0.17$, see *Figure 43*). The parameter associated with item manipulability effect had a probability of 98.4% of being positive ($\text{Median}_{\text{manipulability}} = 0.12$, $\text{CI}_{89\%} = [0.036, 0.21]$) and can be considered as significant (0% in *ROPE*). On average, global distances were underestimated significantly more for manipulable items than for non-manipulable items ($\bar{M}_{\text{manipulable}} = 0.71$, $\text{SD}_{\text{manipulable}} = 0.23$; $\bar{M}_{\text{non-manipulable}} = 0.76$, $\text{SD}_{\text{non-manipulable}} = 0.19$, see *Figure 43*). However, the parameter associated with the interaction effect had a probability of 95.7% of being negative ($\text{Median}_{\text{condition:manipulability}} = -0.14$, $\text{CI}_{89\%} = [-0.27, -0.017]$) while being considered as probably significant (1.26% in *ROPE*). This interaction effect suggests that only active condition contributed to the significant effect of manipulability, while this effect disappeared in the passive motor activity condition (see *Figure 43*).

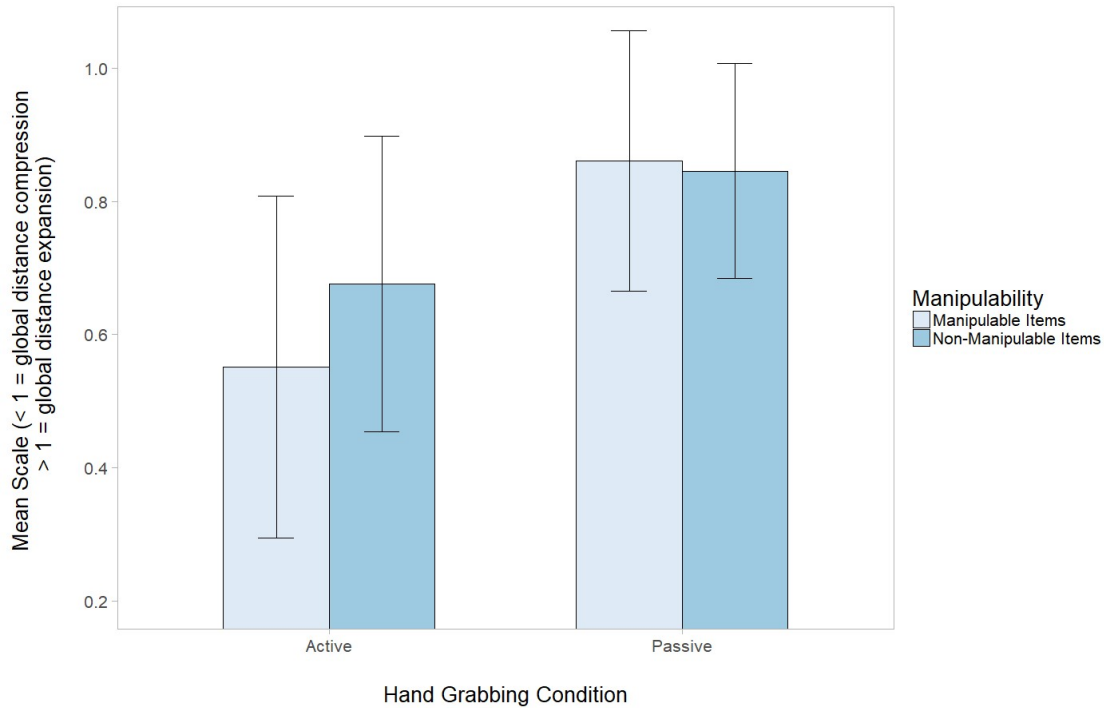


Figure 43 - Mean scale compression in the items position retrieval task as a function of motor activity and objects manipulability (error bars are standard errors)

6.2.4. Discussion

The present study investigated the effect of motor reaching activity and object manipulability on the metric properties encoded and retrieved from spatial representations. It aimed to show that motor interactions in the peripersonal space could influence metric properties estimation in the extrapersonal space. To do so, we asked participants to learn associations of items and spatial positions in immersive virtual reality. In an active condition, participants had to physically grab and drop items at specific locations. In a passive condition, they were simply appearing in front of them such that participants never performed reaching movements to interact with the item. Items were images of manipulable and non manipulable objects. Participants were tested using free recall of images and free map drawing with item positioning. Results showed that actively interacting with objects distorted metric properties in spatial memory (angles and distances estimations between items). This distortion is explained by a global underestimation of distances, which suggests that actively manipulating items biases distances memory in a specific direction, consistent with previous works on reachability and distance estimation (Witt, Proffitt & Epstein, 2005; Witt & Proffitt, 2008).

The global underestimation of distances in memory observed here is in line with early works showing that distances in memory could be retrieved in relation to the body: for example, objects that were close to the protagonist during spatial learning are processed faster on a lexical decision task than distant objects (Glenberg et al., 1987; Morrow et al., 1987), suggesting that objects accessibility is encoded in memory in an action-directed way. Generally, it has been shown that objects alignment with functional axes of the body was determinant for the ease of positions recall from memory, thus advocating for a “spatial framework” where action possibilities and motor asymmetries are driving spatial memory (Franklin & Tversky, 1990). Our results suggest that actively manipulating items during spatial learning can cause distortions of the metric properties of the spatial representation, because of the existence of a body-related spatial framework that emphasizes the functional value of action in memory (Glenberg, 1997). Consequently, the present results constitute a new element in favor of a constructivist and embodied view of spatial representations, such as the “spatial collages” metaphor by Barbara Tversky. This view postulates that spatial representations are thematic overlays of multimedia information about the structure of the environment (Tversky, 1993, 2003). Such vision of spatial representations predicts that the information is systematically distorted, in particular because of the inclusion of non-spatial information such as motivations or action capabilities (Tversky, 2009). Here, we show that action possibilities during learning lead to the encoding and retrieval of non-isomorphic spatial representations in which distances are underestimated because of the inclusion of the environment to the peripersonal space via physical manipulation of objects.

However, this action-related bias on metric properties memory could also be explained by the fact that the active condition was more cognitively demanding than the passive condition in our experiment. This is suggested by the observation of a difference between active and passive condition for free recall: active participants seem to recall less items than passive participants. Although it is possible that active learning was more difficult than passive learning (for items free recall), this could not explain the specific direction of distances biases from memory: distances underestimation is specifically associated with action capabilities in previous studies (Linkenauger et al., 2009; Longo & Lourenco, 2007; Lourenco & Longo, 2009; Witt et al., 2005).

Regarding the effect of manipulability of items, we observed that manipulable items were less recalled than non manipulable items during the free recall task. This could be

explained by the fact that manipulable items share more semantic characteristics than non manipulable items (categories such as tools for example) and are more prone to be encountered in the present context (a house), thus reducing the distinctiveness of these items in memory (Hunt & Worthen, 2006). However, we also observe that manipulable items are associated with more distances underestimation than non manipulable items during spatial positions retrieval. More importantly, this effect seems to interact with the motor activity condition, such as active participants retrieved underestimated distances for manipulable items, but not passive participants. This suggests that manipulable items, which have been shown to elicit automatic motor responses (Tucker & Ellis, 1998, 2004), are more prone to generate distance biases from memory than non manipulable items. This specificity of manipulable items can be explained by the use of motor simulation during spatial retrieval: as motor activations in the brain can be observed when retrieving action related concepts (Bub et al., 2008; Chao & Martin, 2000; Martin, 2007), it is possible that implicit reenactment of the motor interaction for position retrieval is more likely to occur for manipulable items than for non manipulable items.

This idea is in line with embodied views on memory. According to the “Act-In” model of Versace et al. (2014), memory traces are multimodal in the way that they contain all sensory information gathered from experience, distributed across multiple neuronal systems. Therefore, the emergence of a specific knowledge during memory retrieval may arise from interactive activation of sensory experiences, leading to the reenactment of these components through the simulation mechanism (Versace et al., 2014). As spatial knowledge is also built from a categorization process of possible interactions with the environment (Coello & Delevoeye-Turrell, 2007), it seems possible that retrieving items positions in our study involved the simulation of sensory components experienced during learning; and especially motor components of physically grabbing objects for the active group. According to the theory of perceptual symbols systems by Barsalou (1999), this would be even more likely for manipulable objects, which salient features automatically involve motor simulation of hand and arm movements, thus explaining the reachability bias on retrieved distances observed for these items in the active group. However, it is important to point out that the interaction effect discussed here could only be considered marginally significant; which would mean that further investigation could be required to assess that manipulable items are more likely to be linked with distances underestimation from memory if they were involved in physical manipulation during learning.

Taken together, these results are in line with embodied theories of memory and goal-directed views on spatial cognition: they point out that physically interacting with objects can distort metric properties of the global spatial representation of the environment. This can be considered as another argument that spatial representations in memory integrate multimodal information derived from experience (Tversky, 1993, 2003). Moreover, it shows that classical effects of reachability observed for physical spatial perception (Linkenauger et al., 2009; Witt & Proffitt, 2008; Witt et al., 2005) can also be observed regarding mental spaces in memory: physically interacting with objects may lead to some localized narrowing of scales, thus advocating for a non-isotropic nature of spatial representations centered around the body, as a primary reference point.

6.3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

- **Interagir physiquement avec des objets affecte les performances de rappel spatial des positions de ces objets. Cette diminution des performances est expliquée par un biais de rappel des propriétés métriques de la représentation allant dans le sens d'une sous-estimation systématique des distances.** Sur le plan phénoménologique, cette sous-estimation globale des proportions observée par le biais de mesures géométriques sur cartes se caractérise par deux tendances : le rappel de groupes d'items dont les positions sont plus rapprochées que lors de l'apprentissage, et la déviation de toutes les positions de la périphérie vers le centre de la carte. Ces deux phénomènes plus fréquemment observés pour le groupe actif que passif contribuent à l'idée que les positions spatiales ont été biaisées en direction du corps, puisque lors de l'apprentissage les participants actifs ont placé les items à partir d'une position centrée en direction de la périphérie de la pièce. Ceci confirme les effets de la perception de capacités d'actions ou d'accessibilité sur l'estimation des distances immédiates (Linkenauger et al., 2009; Witt et al., 2005), mais à partir de la mémoire et dans une tâche plus implicite (rappel de positions spatiales et non estimation directe de distances). Ceci va dans le sens de l'utilisation implicite du membre supérieur comme une référence implicite pour la perception des distances péripersonnelles (Longo & Lourenco, 2007; Lourenco & Longo, 2009), dans la représentation spatiale également et influençant la globalité de la représentation extrapersonnelle par un processus de rétrécissement des proportions locales.
- **Ce biais de sous-estimation des distances en mémoire semble plus important lorsque les objets avec lesquels les participants actifs ont interagi sont manipulables. Aucune différence de performances spatiales ou de rappel des distances n'a été observée entre les items manipulables et non manipulables pour les participants passifs.** Ceci semble suggérer que les items manipulables potentialisent le biais métrique en mémoire lié à la manipulation durant l'apprentissage. La représentation conceptuelle en mémoire des objets manipulables implique des processus de simulation motrice (Barsalou, 1999; Tucker & Ellis, 1998) qui semblent être mobilisés également lors du rappel de positions à partir de la représentation spatiale. Si la mémoire est dirigée vers l'action (Glenberg, 1997) et que le rappel d'une trace mnésique correspond à la reviviscence de multiples composantes sensorielles (Versace et al., 2014), il semble pertinent de considérer que les objets à la fois manipulables et physiquement manipulés durant l'apprentissage

augmentent la tendance à sous-estimer les distances par sommation des biais de potentiels d'action et mécanismes de simulation motrice.

- **Contrairement à ce qui aurait pu être attendu, l'activité motrice était associée dans ce protocole à une diminution des performances de rappel libre des items (comparé au groupe passif).** En effet, les théories classiques de la mémoire telles que le modèle de la trace multiple (Hintzman, 1986), le modèle du double-codage (Paivio, 1971) ou l'hypothèse de l'apprentissage multimédia (Baggett, 1984) auraient prédit qu'ajouter une trace mnésique supplémentaire et qualitativement différente (action motrice) aurait facilité l'accessibilité de l'item à rappeler en mémoire. Or, nous observons ici une tendance inverse. Ceci est à mettre en relation avec le fait que l'interaction physique était ici réalisée par le biais d'un matériel de réalité virtuelle, nécessitant un entraînement, et augmentant la difficulté de l'apprentissage en rajoutant une certaine portion de ressources cognitive allouées à la manipulation. De plus, nous pouvons considérer que la consigne donnée aux participants a favorisé la focalisation attentionnelle sur les indices spatiaux plutôt que la simple mémorisation de la liste d'items, puisqu'ils étaient prévenus qu'ils devraient rappeler les positions de chaque élément mémorisé sur une carte. Ceci est intéressant du point de vue des effets de la tâche exacte sur les performances : bien que ce protocole d'apprentissage était inspiré de la méthode des lieux (Yates, 1966) servant à augmenter les performances de rappel d'une liste d'items, la consigne n'était pas adaptée à ce type d'entraînement mnémotechnique. Il semble ici que les paramètres saillants de la tâche n'étaient pas les images à rappeler mais bien l'interaction avec les items et la composante spatiale, ce qui explique pourquoi l'activité motrice a eu un effet spécifique sur les propriétés métriques de la représentation spatiale (p. ex. selon Hommel, 2017).

7. SYNTHÈSE DE LA PARTIE EXPERIMENTALE

Nous avons mené quatre études expérimentales qui ont permis de recueillir des observations concernant l'influence des informations sensorimotrices sur la représentation de l'espace en mémoire. Afin de satisfaire à une approche écologique du traitement de l'information spatiale, nous avons choisi d'utiliser la réalité virtuelle comme outil méthodologique permettant d'étudier l'apprentissage spatial actif dans une situation contrôlée semblable au réel pour une partie de ses dimensions. Afin de synthétiser la contribution de ce travail au domaine de la cognition spatiale, nous allons dans cette section reprendre chacune des quatre questions de recherche ayant motivé la partie expérimentale de la thèse en tentant d'y apporter des éléments de réponse issus des observations empiriques. Ces éléments seront par la suite discutés dans une partie consacrée à la mise en perspective théorique des données obtenues au cours de cette thèse.

7.1. LES INFORMATIONS PODOKINETIQUES CONTRIBUENT-ELLES A LA CONSTRUCTION DE LA REPRESENTATION SPATIALE EN MEMOIRE ?

La première étude visait à départager l'effet de la disponibilité des informations podokinétiques lors de l'apprentissage et lors de la récupération. Cette étude a montré que les informations podokinétiques pouvaient contribuer à la construction de la représentation spatiale, mais seulement lorsqu'elles étaient disponibles lors de la phase d'apprentissage, c'est-à-dire lors de l'encodage des informations dans la représentation spatiale du lieu. En effet, aucun effet de la marche lors de la récupération de la représentation spatiale n'a été observé. De plus, l'effet des informations podokinétiques semble facilitateur dans une situation « naturelle », c'est-à-dire lorsque le participant apprend un lieu par la locomotion et que les informations visuelles qui lui sont présentées sont relativement en cohérence avec les informations podokinétiques issues de la marche (étude 1). Cet effet facilitateur semble concerner plus particulièrement la précision des propriétés métriques du lieu en mémoire, puisqu'il se manifeste par une augmentation de la corrélation entre les coordonnées de points de repères rappelés sur une carte et les coordonnées réelles du lieu. Il semble donc que les informations sensorimotrices disponibles lors de l'encodage de la représentation spatiale

contribuent à l'encodage de positions relatives de points de repères, et facilite le rappel ultérieur de ce type d'information spatiale.

Cette idée est renforcée par l'observation de déformation des propriétés métriques lorsque l'information podokinétique n'est plus naturellement liée à l'information visuelle. Nous avons observé dans l'étude 3 qu'introduire une transgression de la cohérence entre les informations podokinétiques et visuelles (lors de l'encodage) pouvait au contraire altérer la précision des performances de rappel de positions spatiales sur cartes. Pour ce faire nous avons demandé aux participants d'apprendre des lieux en parcourant des trajets dont l'inclinaison pouvait être majoritairement montante ou descendante, tout en maintenant constante l'activité de marche pour ces deux types de terrains. Ainsi l'effort musculaire requis pour monter ou descendre une pente était exactement le même, contrairement aux situations réelles auxquelles les participants étaient confrontés. Les résultats montrent que la précision des positions rappelées par les participants est négativement affectée par les trajets montants, ce qui implique que le manque d'effort supplémentaire lors de l'apprentissage en montée a diminué la précision des positions encodées en mémoire. Cet effet semble implicite puisque les participants n'étaient ni conscient du fait que la moitié des trajets étaient en montée, ni du fait qu'il était « plus facile » de gravir les montées dans ce protocole contrairement à ce qui est expérimenté dans le réel.

Corriger la transgression liée aux trajets montants en rajoutant des poids de chevilles aux participants semble faire disparaître l'effet précédemment observé sur ces trajets, tout en n'affectant pas les trajets descendants. Ceci suggère que la synchronie entre information visuelle et podokinétique est également évaluée implicitement en relation avec les connaissances antérieures des individus, sous un format vraisemblablement sémantique : les poids de chevilles ne permettaient pas ici une synchronie parfaite entre l'inclinaison de la pente montante et l'effort développé. Toutefois, ils ont permis de meilleures performances en montée, un terrain sémantiquement catégorisé comme étant associé à un effort supplémentaire de marche. Les poids de chevilles n'ont pas affecté l'apprentissage lors de la marche en descente, un type de terrain non sémantiquement associé à un effort élevé. Il semble donc que les connaissances sémantiques concernant la relation entre terrain et effort aient influencé la perception d'informations visuelles et sémantiques lors de la construction de la représentation spatiale.

Enfin, la contribution des informations podokinétiques ne semble concerner que les paramètres de la représentation spatiale : la reconnaissance de l'apparence visuelle des points de repères n'est pas affectée par la transgression des informations podokinétiques dans l'étude 3, alors que le rappel des coordonnées spatiales de ces mêmes points de repères l'est. Les études 2 et 3 nous permettent d'avancer que les informations podokinétiques influencent les paramètres de la représentation spatiale, et en augmentent potentiellement la précision métrique, si et seulement si :

- elles sont rendues disponibles lors de l'apprentissage actif du lieu par la marche, et non lors de la récupération de l'information spatiale
- elles sont relativement cohérentes avec les informations visuelles et les connaissances issues de l'expérience motrice

7.2. EST-IL POSSIBLE D'OBSERVER LES EFFETS D'UN PROCESSUS DE RECALIBRAGE IMPLICITE DE LA SIMULATION SENSORIMOTRICE SUR LA REPRESENTATION SPATIALE ?

Dans l'étude 2, nous avons choisi d'observer les effets d'un recalibrage de l'effort physique associé à la marche sur l'apprentissage d'un lieu par vidéo. La logique était que si la simulation sensorimotrice est utilisée pour récupérer l'information depuis la représentation spatiale, alors altérer les paramètres subjectifs de vitesse et d'effort de marche devrait altérer les performances mnésiques. Afin de n'étudier que des effets potentiels de ce recalibrage sur des processus de simulation, nous avons choisi de tester nos participants lors d'une tâche de planification d'itinéraire, dans laquelle il est possible que la simulation sensorimotrice soit implicitement utilisée. Les temps de résolution de la tâche étaient observés.

Les résultats ont montré que les participants portant des poids aux chevilles s'estimaient implicitement plus lents que ceux n'ayant pas porté de poids aux chevilles, et ce en absence de différence de vitesse de marche réelle (chronométrée). Cette diminution de vitesse de marche estimée subjectivement et implicitement ne semblait pas s'accompagner d'un effet sur les temps de planification : les participants lestés s'estimant plus lents ne mettaient pas plus de temps à planifier des trajets que les participants non lestés. Toutefois, nous avons observé un effet d'interaction tendanciel entre le port de poids et les capacités spatiales globales des participants : il est possible que seuls les participants disposant de

capacités spatiales relativement faibles mettent plus de temps à planifier les trajets lorsqu'ils sont lestés. Si cet effet d'interaction se confirmait lors de répliques ultérieures, ceci signifierait que plus un participant dispose de capacités spatiales élevées, moins les poids lestés affectent sa vitesse de planification. Il est donc possible que les participants ayant un score élevé en capacités spatiales globales puissent recruter d'autres modes de réponse que la reviviscence des paramètres physiques de la marche lors de la planification. En revanche, les participants disposant de capacités spatiales faibles ne seraient pas forcément capables de changer de mécanisme de rappel, et auraient donc tendance à simuler mentalement la marche même lorsque les paramètres de vitesse et d'effort liés à la locomotion ont été recalibrés par le port de poids lestés.

Ainsi ces résultats suggèrent que, si la simulation sensorimotrice des paramètres mécaniques de la marche est bien utilisée lors du rappel de l'information spatiale, elle pourrait être éventuellement « court-circuitée » par les individus disposant de capacités spatiales élevées (sous réserve de répliques). Ce phénomène apparaîtrait ici en réponse à un recalibrage de l'effort et de la perception de vitesse, diminuant la pertinence des informations podokinétiques qui ont été transgressées. Cette idée est tout à fait dans la lignée des autres études de la thèse : les informations sensorimotrices sont encodées et récupérées pour le traitement de l'information spatiale, seulement dans le cas où elles sont pertinentes à la résolution correcte de la tâche. Mais il est également possible d'observer des biais de récupération en mémoire possiblement liés à la simulation sensorimotrice dans des situations où aucune transgression n'est imposée à l'information sensorimotrice, comme le montre l'étude 4. Dans cette étude, les participants qui ont physiquement manipulé des objets ont eu tendance à sous-estimer globalement l'ensemble des distances lors d'une tâche de positionnement de ces objets sur une carte. Ce résultat peut s'expliquer par l'utilisation de la simulation sensorimotrice du mouvement effectué lors de la phase d'apprentissage pour récupérer les coordonnées de l'objet dans la représentation spatiale. Cette idée est confortée par l'observation d'un autre effet d'interaction tendanciel entre le type d'item et l'activité motrice lors de l'apprentissage : il semble que les distances soient davantage sous-estimées pour les items manipulables que non manipulables, mais seulement pour les participants ayant interagi avec ces items. Puisque les items étaient présentés sous forme d'image, il est alors possible que les concepts d'objets manipulables (dont nous savons qu'ils impliquent la simulation motrice) aient été amorcés sous un format lié à l'action chez les participants qui

ont interagi avec les items, et sous un format plus sémantique voire lexical chez les participants ayant simplement regardé l'image.

Ainsi l'étude 4 montre que la simulation sensorimotrice de l'activité physique dont l'individu a fait l'expérience durant l'encodage peut conduire à un recalibrage des distances en lien avec les capacités d'actions péripersonnelles : si l'item a été manipulé, alors il était sans doute proche du corps. Il est important de préciser que les effets pouvant témoigner de l'existence de processus liés à la simulation sensorimotrice, et à ses conséquences sur la récupération des propriétés de la représentation, sont ici des ouvertures nécessitant plus d'investigations : certains effets n'étaient que tendanciels et les protocoles utilisés ne permettaient pas de tester spécifiquement le phénomène de simulation sensorimotrice. Toutefois les tendances observées doivent être discutées et étudiées dans de futures études, car elles témoignent d'une part de variabilité attribuable à des processus sensorimoteurs dans un traitement spatial assez majoritairement issu d'informations visuelles.

7.3. LE *DISTANCE-ON-HILL EFFECT* POURRAIT-IL ETRE OBSERVE DEPUIS LA MEMOIRE, APRES UN APPRENTISSAGE SPATIAL COMPLEXE ET ACTIF ?

Cette question fût adressée par le biais de l'étude 3, qui montra que les résultats classiques du *distance-on-hill effect* (surestimation des distances en pentes montantes) n'étaient sans doute pas répliquables dans toutes les situations de traitement de l'information spatiale. Par exemple, lorsque l'apprentissage est actif et que les distances sont testées implicitement depuis la mémoire, le *distance-on-hill effect* classique n'est plus observé : il est même inversé (sous-estimation des distances montantes) lorsque l'information podokinétique liée à l'effort de marche est maintenue constante entre les pentes montantes et descendantes. Ceci implique que l'organisme serait tout à fait capable de détecter une anomalie dans la synchronie entre informations sensorimotrices et visuelle (même en l'absence de ressenti conscient de la part du participant), et appliquerait une sorte de correction aux distances mémorisées : un recalibrage implicite de la relation entre effort et distances parcourues. Bien entendu, le fait que cet effet inversé disparaît lorsque la sensation d'effort physique plus important en montée est rétabli par le biais de poids suggère que dans une situation d'apprentissage actif où les informations visuelles et podokinétiques sont correctement synchronisées, le *distance-on-hill effect* ne pourrait plus être observé.

Ainsi le distance-on-hill effect classiquement décrit dans la littérature ne semble concerner que les tâches perceptives d'estimation de distances, et lorsque le participant est statique devant une pente. Dans le cas où l'apprentissage est actif et les distances rappelées depuis la représentation spatiale, des mécanismes d'intégration multimodale (entre effort anticipé visuellement et effort ressenti notamment) semblent parvenir à maintenir un niveau de précision des propriétés métriques du lieu relativement élevé. Ces résultats font écho au fait que lorsque la marche « naturelle » est disponible lors de l'apprentissage sans qu'aucun indice d'effort physique soit transgressé (étude 1), les informations podokinétiques permettent une meilleure précision du rappel spatial. De plus, lorsque la perception d'effort physique à la marche est recalibrée mais l'information visuelle est cette fois-ci maintenue constante (étude 2), nous observons un effet négatif des informations podokinétiques sur les performances de rappel spatial. Enfin, nous pouvons considérer que la légère surestimation des distances observée dans l'étude 1 pour le groupe ayant marché à la fois durant l'encodage et la récupération reflète un effet de l'effort physique et/ou de la fatigue plus important : cet effort physique plus élevé que les autres groupes modifie également le ratio perçu entre coûts métaboliques et distance parcourue et conduit possiblement à une surestimation des distances, non plus liée à l'anticipation d'effort (*distance-on-hill effect*) mais causée par l'état de fatigue actuel.

Ces résultats convergent en faveur de l'idée selon laquelle les informations sensorimotrices en lien avec l'effort podokinétique et les coûts énergétiques de la marche modulent la précision de la représentation spatiale, et peuvent affecter les performances de rappel différemment en fonction du ratio (réel ou perçu) entre coûts métaboliques et retours sensoriels.

7.4. L'ACTIVITE MOTRICE LIEE AUX ACTIONS EFFECTUEES DANS L'ESPACE PERI-PERSONNEL INFLUENCE-T-ELLE LES PROPRIETES DE LA REPRESENTATION SPATIALE DE L'ESPACE EXTRA-PERSONNEL ?

Les trois premières études se sont concentrées sur la contribution des informations podokinétiques à la représentation spatiale. Dans la quatrième étude, nous avons choisi d'observer comment les informations sensorimotrices issues d'un autre type d'action que la marche influencent les propriétés métriques de la représentation spatiale. Pour ce faire nous avons choisi d'utiliser l'action de saisie comme un facteur principal, puisque nous disposons

actuellement d'un grand nombre d'études traitant de la saisie manuelle et de l'atteignabilité sur la perception ou la mémoire des concepts, alors que peu d'études concernent la mémoire spatiale dans ce domaine. L'intérêt de la dernière étude était ainsi d'observer comment les comportements d'interaction (saisie et pose) contenus dans l'espace péripersonnel durant l'apprentissage pouvaient éventuellement biaiser le rappel des positions spatiales de ces objets, et la forme de la représentation globale du lieu (distance extrapersonnelle).

Les résultats de cette étude montrent que mémoriser la position d'objets en les ayant physiquement manipulés conduit les participants à sous-estimer toutes les distances lors d'une tâche de positionnement de position spatiale de ces objets sur carte. L'interaction physique impliquant la présence de la cible de l'action dans la distance de capacités d'actions de l'individu (la distance péripersonnelle), les distances de l'ensemble du lieu semblent être compressées par l'encodage d'un jugement d'accessibilité des divers éléments le composant. En effet, cet effet émergent depuis l'espace péripersonnel contenant les capacités d'action semble contaminer l'ensemble de la représentation extrapersonnelle du lieu dans notre étude : les distances sont globalement sous-estimées à partir du positionnement de celles-ci sur carte et non à partir d'estimations de distances entre les items et le participant. En résumé, le biais de sous-estimation des distances contenues dans la limite des capacités d'actions (classiquement observées dans des études précédentes) peut affecter la représentation globale d'un lieu : les distorsions locales ont un effet sur l'ensemble des distances moyennées du lieu.

Dans une certaine mesure, ces résultats ne sont pas si différents de ceux obtenus dans l'étude 3 : il est possible de considérer que les distorsions métriques causées par les pentes montantes sont également des distorsions locales contenues dans un espace « affordant » une certaine capacité d'action : la marche. Ici, puisque les informations sensorimotrices ne sont plus en accord avec l'anticipation visuelle d'effort physique, le biais causé sur l'ensemble des propriétés métriques du lieu reflète encore une fois un jugement d'accessibilité : les pentes montantes sont vécues comme moins coûteuses que dans la réalité, donc l'espace est compressé en mémoire car il est plus « immédiatement accessible » (les distances semblent moins longues en montée que dans la réalité). Globalement, nous pouvons affirmer à partir de ces deux dernières études que les éventuels biais liés aux capacités d'actions contenues dans l'espace péripersonnel durant l'apprentissage spatial ont des conséquences sur les propriétés métriques globales de la représentation en mémoire. Ces conséquences sont systématiquement observables au travers de distorsions métriques dans une direction particulière : celle de la

sous-estimation globale des distances lorsque les capacités d'actions sont surestimées. De plus, lorsque les capacités d'action sont cette fois-ci sous-estimées (par exemple lors de l'étude 1 pour le groupe ayant plus marché que les autres groupes) à cause de la fatigue, le biais métrique en mémoire semble changer de direction et tendre vers l'expansion des distances globalement mémorisées.

8. DISCUSSION GÉNÉRALE

8.1. PROPOS SUR LE CARACTERE ECOLOGIQUE DE LA THESE

8.1.1. De l'usage de la réalité virtuelle

Avant de discuter les implications théoriques des résultats obtenus au cours de cette thèse, il semble important de mettre l'accent sur les apports et les limites éventuelles de l'outil méthodologique que nous avons utilisé au cours des quatre expériences : la réalité virtuelle. L'utilisation de cette technique pour répondre à nos questionnements initiaux s'est imposée d'elle-même car elle possède un grand nombre d'avantages pour l'étude de la connaissance spatiale ; elle constitue un outil de recherche particulièrement utile en psychologie et sciences cognitives (Loomis, Blascovich, & Beall, 1999).

8.1.1.1. *Réalisme, immersion et présence*

La réalité virtuelle se définit comme une technique émulant certains aspects du réel par le biais d'une simulation informatique interactive (Fuchs & Moreau, 2006), elle permet alors de placer le participant dans une situation jugée réaliste. La notion de réalisme en réalité virtuelle est relative au degré de ressemblance entre la simulation et la réalité, par exemple au niveau de la fidélité perceptive (Stoffregen, Bardy, Smart, & Pagulayan, 2003) ou de la fidélité psychologique (Burkhardt, 2003). Pour qu'un environnement virtuel soit considéré suffisamment réaliste, il faut donc respecter une certaine concordance entre la simulation et la réalité, concernant l'aspect graphique, les règles physiques gouvernant l'interaction entre et avec les objets, ou encore l'agencement des éléments. En parallèle à la notion de réalisme (qui est une propriété de la simulation) deux notions relatives à l'état de l'individu en interaction avec le monde virtuel sont à considérer : les sentiments d'immersion et de présence. L'immersion est définie comme l'état d'un participant lorsque l'un ou plusieurs de ses sens est (partiellement ou totalement) isolé du monde extérieur, et que les informations sensorielles qui lui parviennent ne sont issues que de l'ordinateur et non de la réalité (Pimentel & Texeira, 1993). Plus l'immersion est importante, plus le participant est susceptible de faire l'expérience d'un sentiment de présence d'intensité plus ou moins élevée : c'est-à-dire le sentiment d'exister physiquement dans un environnement virtuel synthétique (Sheridan, 1992), qui sollicite nos sens, capture notre attention, et stimule notre implication active (Witmer, Jerome, & Singer, 2005). Le sentiment de présence est également favorisé par les

possibilités d'actions qu'offre l'environnement virtuel, et correspond donc au sentiment de pouvoir agir sur le monde virtuel selon une perspective plus située et incarnée (Sanchez-vives & Slater, 2005; Schubert, Friedmann, & Regenbrecht, 2001).

Ainsi, lorsque l'environnement virtuel dans lequel l'individu est plongé est jugé réaliste, immersif et prompt à susciter le sentiment de présence, les comportements pouvant être observés sont supposés être relativement proches des comportements observables en milieu réel. Or, de nombreux protocoles de recherche en laboratoire n'utilisant pas la réalité virtuelle (ou utilisant une technologie de réalité virtuelle rudimentaire, peu réaliste et peu immersive) ont été critiqués pour leur manque de validité écologique (Araújo, Davids, & Passos, 2007; Schmuckler, 2001). Ces critiques mettent en avant l'aspect artificiel des tâches de laboratoire, au détriment d'approches plus naturalistes, notamment concernant l'étude de la mémoire (Conway, 1991; Neisser, 1982). Ceci implique qu'une portion des outils méthodologiques employés en psychologie expérimentale peuvent fournir des résultats qui ne sont pas forcément généralisables au comportement de l'individu dans son milieu quotidien. La réalité virtuelle immersive semble corriger ce problème, puisque les participants faisant l'expérience du sentiment de présence produisent des réactions physiologiques et comportementales analogues ou très proches de celles produites en réponse à des phénomènes réels (Mestre, 2006; Slater, 2002). Plus particulièrement, d'importantes similitudes ont été observées dans des tâches de navigation spatiale (Mellet et al., 2010; Waller & Greenauer, 2007) entre les productions comportementales et les activations cérébrales en réalité virtuelle comparées au milieu réel. De plus, le sentiment de présence est associé à ce que Slater appelle « l'illusion de l'endroit » : l'illusion d'être physiquement présent dans un lieu en dépit de la connaissance consciente de ne pas y être. Cette illusion est supposée induire la production de comportements réalistes lors de la navigation en environnement virtuel immersif (Slater, 2009).

La réalité virtuelle a également l'avantage de permettre une plus grande sécurité du participant comparé aux études en milieu naturel (et en particulier en milieu urbain) tout en garantissant la mobilisation de mécanismes analogues ; elle augmente considérablement la faisabilité des protocoles de recherche pouvant présenter un risque modéré pour l'individu (Pan & Hamilton, 2018). Ceci justifie particulièrement l'utilisation de cette technique dans le cadre de cette thèse, dans laquelle les études auraient impliqué un effort physique soutenu par nos participants dans un contexte urbain. Toutefois, il faut également souligner que

l'interaction permise par les périphériques immersifs n'est pas toujours tout à fait conforme avec les méthodes de déplacement et d'interaction dont l'individu dispose en milieu naturel : la grande majorité des périphériques immersifs sont symboliques, c'est-à-dire qu'ils traduisent une action motrice en une autre action non analogue (par exemple, l'utilisation d'un joystick pour la locomotion). Bien que dans cette thèse les périphériques choisis permettent une analogie relativement élevée entre les gestes effectués dans la réalité et ceux effectués en réalité virtuelle (tapis omnidirectionnel par exemple), ils ont tout de même systématiquement nécessité l'inclusion d'une phase de familiarisation. Cette phase servait à entraîner le participant à l'utilisation des périphériques et des techniques de déplacement jusqu'à ce qu'il se sente à l'aise avec le matériel. De ce fait, il est important de mentionner que l'interaction entre le participant et le monde virtuel, dans l'état actuel des technologies, n'est pas encore tout à fait naturelle et force à relativiser la portée des notions d'immersion, de présence et de réalisme.

8.1.1.2. *Contrôle expérimental et reproductibilité*

La méthode expérimentale en psychologie consiste en l'observation de comportements mis à l'œuvre dans des situations contrôlées, dont les variables sur lesquelles portent les hypothèses sont connues et manipulées. Ceci implique que les potentielles sources de variation pouvant interférer avec les mécanismes cognitifs faisant l'objet du protocole de recherche doivent être écartées de la tâche à remplir. Diminuer l'impact du plus grand nombre de ces sources de variation interférentes contribue à maximiser le contrôle de la situation expérimentale. La réalité virtuelle permet de maximiser le contrôle des situations complexes en créant un scénario virtuel dans lequel tout ce qui est présenté au participant est provoqué par l'expérimentateur (Pan & Hamilton, 2018). Ainsi il est possible grâce à la réalité virtuelle d'isoler les paramètres exacts sur lesquels porte l'étude afin de mieux quantifier l'effet de certains facteurs sur le comportement humain (par exemple, isoler l'effet de la perception visuelle de pentes sur les performances de positionnement de points de repères, voir étude 3).

Toutefois la maximisation du contrôle expérimental se fait souvent au détriment de la validité écologique, puisqu'elle nécessite l'appauvrissement de la situation réelle (par suppression des phénomènes pouvant capter l'attention de manière incidente par exemple). Ainsi plusieurs auteurs ont décrit l'utilisation de la réalité virtuelle en sciences comme la recherche d'un équilibre entre la validité écologique et le contrôle expérimental (Burkhardt, Bardy, & Lourdeaux, 2003; Loomis et al., 1999; Parsons, 2015). Dans cette optique, la réalité

virtuelle immersive permet d'atteindre les meilleurs résultats (voir *Figure 44*), en confrontant les participants à des situations « parfaites » non observables dans le quotidien. Par exemple, de nombreux biais de planification d'itinéraires ont été identifiés en navigation réelle ou à partir de cartes (voir Golledge, 1995; Grison, 2015) : la prise en compte de ces biais lors du développement des réseaux routiers de nos environnements virtuels (études 1, 2 et 3) nous a donc permis de limiter leur influence sur le traitement de l'information spatiale effectué par les participants. En parallèle de la construction de ces scénarios spatiaux contrôlés, nous nous sommes également assurés que les participants percevaient l'environnement virtuel comme suffisamment réaliste par l'utilisation du questionnaire sur l'état de présence (Witmer et al., 2005) et la disponibilité de normes établies par le laboratoire de cyberpsychologie de l'UQO (Université du Québec en Outaouais) datant de 2013.

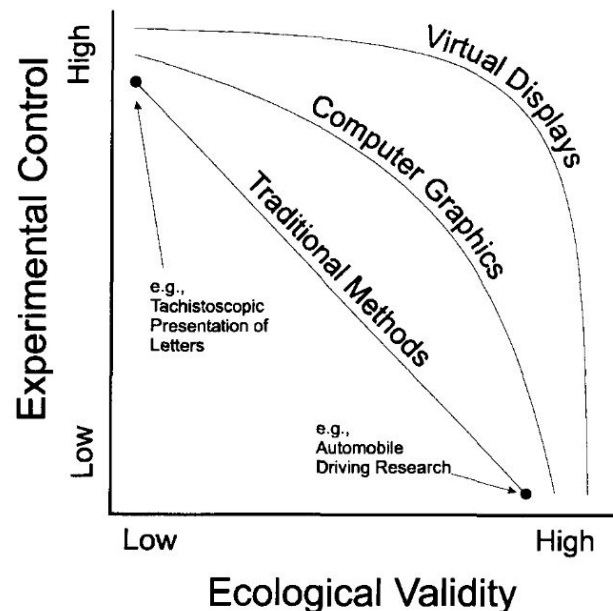


Figure 44 - Illustration du compromis entre contrôle expérimental et validité écologique en réalité virtuelle (tiré de Loomis et al., 1999, p. 558)

Enfin, par le contrôle expérimental permis par la réalité virtuelle, les protocoles ayant recours à cet outil ont un avantage significatif en termes de reproductibilité (Pan & Hamilton, 2018), et ce particulièrement en comparaison avec les protocoles quasi-expérimentaux en milieu naturel. La psychologie expérimentale faisant actuellement face à des inquiétudes liées à la difficulté à reproduire certains résultats (Aarts & Lin, 2015), il semble important de préciser que les protocoles en réalité virtuelle peuvent être partagés et implémentés facilement par le biais d'interfaces de programmation abordables ou même gratuite au plan financier (p.

ex. le logiciel Unity dans le cadre de cette thèse). Sur ce point, la reproductibilité des protocoles en réalité virtuelle a été largement améliorée au cours des dernières années grâce à la diminution du coût associé à l'acquisition du matériel informatique (et des périphériques immersifs notamment), mais également grâce à la mise à disposition d'interfaces graphiques et de communautés dédiées facilitant l'accessibilité à la programmation. Ainsi, il est aujourd'hui possible pour un chercheur en psychologie de se former à la réalité virtuelle pour pouvoir mettre en œuvre (ou implémenter/modifier) des protocoles de recherche en relative autonomie.

8.1.1.3. *Transgressions locales*

La réalité virtuelle permet également de créer des situations nouvelles, n'ayant jamais été observées auparavant car leurs paramètres sont théoriquement inobservables dans la réalité. Il est par exemple possible de faire varier précisément en réalité virtuelle des invariants physiques de la réalité, afin d'observer les effets de ces transgressions locales du réel. Par exemple, les travaux se concentrant sur l'effet de l'accélération causée par la gravité sur les comportements de saisie ont utilisé la réalité virtuelle pour manipuler artificiellement les effets visuels de la gravité (voir p. ex. Senot, Zago, Lacquaniti, & McIntyre, 2005). Dans le domaine de la cognition spatiale, plusieurs études se sont intéressées à la perception d'espaces dans lesquels certaines lois de la géométrie avaient été transgressées (Warren, Rothman, Schnapp, & Ericson, 2017; Zetsche, Wolter, Galbraith, & Schill, 2009) grâce au développement d'environnements virtuels à géométrie non-euclidienne. Ces études suggèrent que des variations dans les régularités physiques connues par les participants grâce à leur expérience du réel peuvent modifier le fonctionnement de certains processus cognitifs. Ainsi dans cette thèse, nous avons choisi d'utiliser cette propriété de la réalité virtuelle pour étudier l'apprentissage actif de trajets inclinés tout en maintenant l'effort physique constant (étude 3). Cette méthode nous a permis d'isoler un élément particulier du traitement de l'information spatiale (l'anticipation visuelle implicite du coût énergétique à la locomotion) et d'apporter de nouveaux éléments au champ théorique du *distance-on-hill effect*.

Les innombrables possibilités qu'offre la réalité virtuelle s'accompagnent également de limites : un protocole dans lequel les informations visuelles et physiques fournies aux participants sont désynchronisées augmente les risques d'expérience de *motion sickness*. Le phénomène de *motion sickness* est principalement lié à l'expérience de conflits sensoriels entre les informations visuelles et vestibulaires, et se caractérise par des symptômes de

dérèglement gastro-intestinal, de fatigue généralisée et d'anxiété (Keshavarz & Hecht, 2011). De ce fait, les protocoles de recherche en réalité virtuelle doivent respecter une certaine qualité technique garantissant l'absence d'artéfacts informatiques (délais ou pauses) pouvant augmenter le risque d'inconfort physiologique. Il est également primordial de veiller à ce que la manipulation des facteurs de l'expérience n'induisse pas d'inconfort. Nous savons depuis les débuts de la réalité virtuelle que l'expérience de *motion sickness* est particulièrement associée à l'activité de déplacement en réalité virtuelle (McCauley & Sharkey, 1992), ce qui fait de la recherche en apprentissage spatial actif un domaine « à risque » pour ce type de limite. Toutefois il faut signaler que, au cours des quatre expériences présentées dans cette thèse, seulement cinq participants ont demandé à mettre fin à l'expérience après avoir ressenti un début de symptôme d'inconfort. Ceci représente un taux de 1.23% de participants exclus pour risque de *motion sickness*, ce qui constitue un effectif extrêmement faible. A cette observation s'ajoute le fait que de nombreux facteurs individuels influencent la sensibilité à la *motion sickness* (Rebenitsch & Owen, 2014), suggérant que cet effectif pourrait être réduit par une sélection préalable des participants sur la base de questionnaires (Golding, 2006) ou de mesures physiologiques (Dennison, Wisti, & D'Zmura, 2016) prédisant la survenue éventuelle de symptômes.

Enfin, il faut être conscient que l'expérience perceptive de l'individu en réalité virtuelle est *a priori* déformée par l'outil lui-même, et ce notamment en ce qui concerne la perception visuelle des profondeurs. Il a été montré à de multiples reprises que les distances étaient systématiquement sous-estimées en réalité virtuelle (Loomis & Knapp, 2003; Renner, Velichkovsky, & Helmert, 2013). Parmi la grande variété de facteurs contribuant à ce phénomène, nous pouvons citer par exemple les déformations géométriques liées à la largeur du champ de vision (Kellner et al., 2012) ou à son inclinaison (Leyrer, Linkenauger, Bühlhoff, Kloos, & Mohler, 2011), ainsi que les aspects liés à l'acuité graphique (Kunz, Wouters, Smith, Thompson, & Creem-Regehr, 2009) ou encore la luminosité ambiante (Tai, 2012). Cette difficulté matérielle à reproduire correctement la sensation de profondeur visuelle en réalité virtuelle conduit à une sous-estimation plus importante pour des environnements à grande-échelle, dans lesquels les indices de distances extra-personnelles sont plus compliqués à modéliser (Armbrüster, Wolter, Kuhlen, Spijkers, & Fimm, 2008). Ainsi ceci explique pourquoi nos participants ont eu systématiquement tendance à sous-estimer les distances (études 1, 3 et 4). Toutefois la transgression géométrique ou visuelle étant à la racine de ce

phénomène n'impacte probablement que peu nos résultats, puisque tous nos participants ont tous été confrontés à l'apprentissage des mêmes lieux en réalité virtuelle.

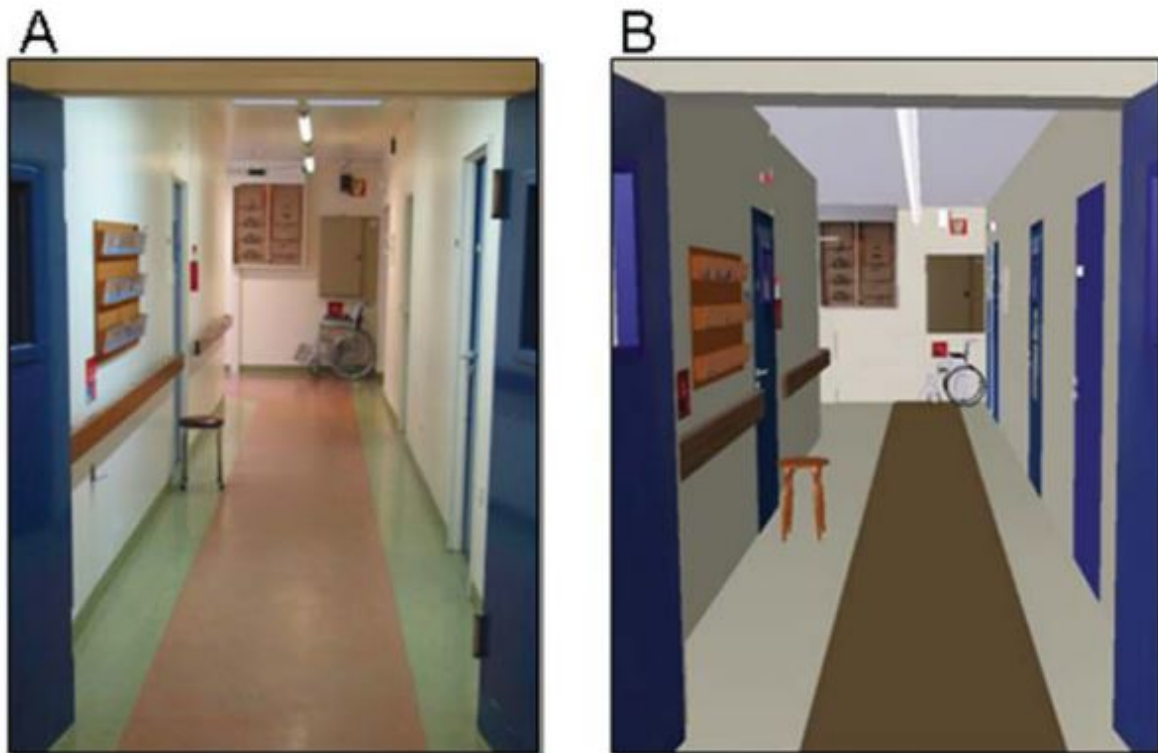


Figure 45 - Comparaison de distances entre un environnement réel (A) et une reproduction à l'échelle en réalité virtuelle (B). Tiré de Mellet et al. (2010, p. 1067)

8.1.1.4. Exemples de perspectives appliquées

Les résultats obtenus au cours de cette thèse ont contribué à rassembler de nouveaux éléments appuyant une approche située et incarnée de la mémoire spatiale. Le caractère « écologique » des études empiriques permet un niveau de confiance satisfaisant quant à la généralisation des résultats obtenus lors du traitement réel de l'information spatiale dans un contexte urbain. Ce transfert de la connaissance vers le milieu environnemental est un élément important à promouvoir dans le domaine de la cognition spatiale, qui possède un grand nombre d'applications pouvant bénéficier au quotidien des individus (Denis, 2018). Ces applications émergent de problématiques liées à la mobilité et à la sante, particulièrement bien illustrée à travers le développement d'assistances à la navigation par exemple (Grison & Gyselinck, 2019).

Parmi les applications potentielles d'une approche située et incarnée des représentations spatiales à ce domaine, nous pouvons notamment citer le développement d'assistances à la navigation adaptées aux personnes mal voyantes. Ces outils concernent actuellement la planification d'itinéraires en transports en commun (Sánchez & Maureira, 2007) ou durant la locomotion virage par virage (Ahmetovic et al., 2016). Toutefois le développement de ce type d'assistance s'appuie principalement sur la modalité auditive (Auvray, Hanneton, & O'Regan, 2007) ou sur le transfert d'information par dispositifs vibrants (Bourbakis, 2008) pour aider à la localisation de l'individu dans l'espace (pour une revue, voir Dakopoulos & Bourbakis, 2010). Or, malgré la connaissance du fait que les informations podokinétiques permettent à des personnes non voyantes d'appréhender les distances avec précision (Afonso et al., 2010; Klatzky et al., 1990), peu d'assistances à la navigation intègrent cette donnée dans leur fonctionnement. Nos résultats suggèrent que l'inclusion de méthodes d'apprentissage liées aux informations podokinétiques recueillies durant le trajet devrait permettre d'améliorer la précision métrique de la représentation mentale créée par des individus mal voyants, et ainsi proposer des pistes intéressantes vers le développement d'assistances mieux adaptées à cette population.

Un problème majeur des assistances à la navigation est notamment le fait que ce type d'outil est également connu pour détériorer les performances de mémoire spatiale chez des sujets sains (Waters & Winter, 2011), notamment par le biais de division attentionnelle (Gardony, Brunyé, Mahoney, & Taylor, 2013), de passivité cognitive (Leshed, Velden, Rieger, Kot, & Sengers, 2008) voire « d'infantilisation technologique » (Montello & Raubal, 2013). De plus, les assistances à la navigation ne permettent pas le développement de représentations spatiales flexibles (Brunyé, Haga, Houck, & Taylor, 2017), et ne favorisent donc pas l'indépendance des individus en relation avec des incidents de trajets nécessitant la recherche d'un itinéraire alternatif (Huang, Tsai, & Huang, 2012). En raison de l'effet positif des informations podokinétiques lors de l'apprentissage spatial et de leur influence sur la précision des propriétés métriques lors du déplacement naturel (Chrastil & Warren, 2012), il est possible que favoriser l'utilisation des informations liées à la marche (terrain, pentes, rythme de marche etc.) dans l'orientation spatiale puisse favoriser les performances des utilisateurs. Ce type d'implémentation pourrait être effectué en parallèle de la prise en compte des préférences de l'utilisateur (Grison & Gyselinck, 2019), notamment au sujet de l'effort ou de la vitesse de marche habituelle liée aux trajets (Witt, Linkenauger, & Wickens, 2016).

Enfin, il nous semble important de mentionner que si les informations podokinétiques influencent les propriétés métriques de la représentation spatiale, ce type de facteur est une donnée essentielle à prendre en compte dans le développement de l'infrastructure liée à la mobilité, et en particulier concernant les cartes servant de support à la navigation. Ceci est particulièrement vrai concernant l'essor de l'utilisation des transports en commun, qui a conduit à une compression des dimensions spatiotemporelles à l'échelle géographique en raison de l'augmentation de l'accessibilité globale (Spiekermann & Wegener, 1994). Or ce type de biais ainsi que des biais possiblement liés à l'information podokinétique elle-même (Brunyé, Mahoney, Gardony, & Taylor, 2010) contribuent à des déformations systématiques des représentations qui ne sont pas correctement corrigées par les cartes (Tversky, 2000). Malgré quelques efforts pour fournir des représentations plus adaptées à l'expérience active et naturelle de l'utilisateur avec son milieu (p. ex. Quercia, Paulo Pesce, Almeida, & Crowcroft, 2013), nous constatons que peu de supports cartographiques prennent en compte les paramètres empiriques d'interaction des individus avec l'information spatiale (et notamment l'effort de marche) dans leur design. Il semble donc primordial de valoriser le développement de supports de représentation de l'information conformes à la nature des représentations spatiales multimodales et flexibles, afin de permettre une meilleure autonomie des usagers dans leur mobilité quotidienne.

8.2. VERS UNE APPROCHE INTEGRATIVE DES REPRESENTATIONS SPATIALES

L'objectif de cette thèse était de mieux comprendre comment les informations sensorimotrices participent à la représentation d'un lieu en mémoire. Notre hypothèse était que les informations issues du corps contribuent spécifiquement à ajuster les propriétés métriques de la représentation spatiale, c'est-à-dire à moduler la valeur des angles et distances mémorisés entre différents points de repères issus de l'environnement. Afin de tester cette idée, nous avons imaginé plusieurs protocoles impliquant un apprentissage spatial dans lequel les informations sensorimotrices pouvaient être rendues disponibles ou altérées, et nous avons observé les conséquences de ces manipulations sur des tâches variées dont le rappel de coordonnées spatiales sur carte. Une approche écologique a été adoptée dans le but de favoriser l'observation de comportements naturels similaires à ceux produits par les individus dans l'exécution de tâches spatiales quotidiennes. La réalité virtuelle, permettant de proposer des tâches d'apprentissage spatial dans des lieux complexes et réalistes à grande-échelle, a de ce fait été privilégiée. Les trois premières études se sont concentrées sur l'effet d'un type d'information sensorimotrice particulièrement pertinent lors de l'apprentissage spatial de ce type de lieux : les informations podokinétiques dérivées de l'action de marche (Weber, Fletcher, Gordon, Melvill Jones, & Block, 1998). La dernière étude de la thèse a proposé une investigation de la contribution d'un autre type d'action lors de l'apprentissage de lieux : les comportements de saisie d'objets manipulables. Bien que les deux types d'actions motrices (marche et saisie) impliquent des réseaux corticaux, des activités musculaires et des sensations proprioceptives radicalement différents, nous avons pu rassembler des arguments en faveur de l'idée qu'ils contribuent tous deux à l'encodage des propriétés métriques des représentations spatiales. Cette conclusion est justifiée par un grand nombre de données issues de la revue de littérature et des observations empiriques recueillies au cours de cette thèse, pouvant se résumer de la façon suivante :

- Marcher durant l'encodage de la représentation spatiale en mémoire améliore les performances de rappel des propriétés métriques du lieu
- Recalibrer la perception d'effort et de vitesse de marche avant l'apprentissage spatial détériore les performances ultérieures de rappel de positions spatiales
- Perturber la relation entre l'effort physique de marche anticipé et effort réel durant l'apprentissage spatial déforme les propriétés métriques de la représentation lors du rappel de positions spatiales

- Manipuler des objets durant l'apprentissage d'un lieu conduit à compresser toutes les distances lors du rappel des positions spatiales de ces objets.

L'ensemble de ces données semble converger en direction d'une vision située et incarnée des représentations spatiales : l'espace tel qu'il existe en mémoire n'est *pas seulement* une carte géographique du lieu appris, ni un schéma topologique des relations catégorielles spatiales. Il est conservé sous une forme bien plus complexe, une entité n'intégrant pas seulement les positions spatiales mais un grand nombre d'informations de natures diverses sous une forme dynamique. De plus, il apparaît clairement que le traitement spatial n'est pas systématiquement influencé par la disponibilité d'informations sensorimotrices, il ne l'est que sous certaines conditions, motivant certaines directions des effets observés. Nous soutenons l'hypothèse que ces conditions d'apparition d'effets spécifiques à l'action sur le traitement de l'information spatiale sont réunies sous l'égide de la pertinence des informations liées au corps : à l'image du principe d'*intentional weighting* développé par Hommel et collaborateurs (Hommel, 2017; Memelink & Hommel, 2013) ; certaines situations amorcent l'utilisation d'informations empiriques (dans notre cas, les informations sensorimotrices en lien avec l'action) vécues durant l'expérience réelle avec l'environnement. Cette vision motive la prise de position en faveur de l'idée suivante : il n'existe pas de tâche de mémoire spatiale pure, il n'existe qu'une variété de tâches à effectuer, dans lesquelles il apparaît comme plus ou moins pertinent (du point de vue de l'organisme) d'utiliser les informations sensorimotrices (disponibles ou simulées), afin de répondre à différentes motivations (économie d'action ou précision par exemple). Ces ressources sensorimotrices et les buts associés à l'emploi de ces ressources ne sont pas indépendantes les unes des autres, elles existent sous la forme d'un gradient cohérent avec l'idée d'une représentation spatiale multimodale, non euclidienne et dynamique parfaitement illustrée par la métaphore des collages spatiaux (Tversky, 1993, 2003). Cette vision implique (pour un seul lieu) la coexistence en mémoire de multiples représentations organisées en couches successives de formats ou de perspectives. Considérer les représentations spatiales comme des collages multidimensionnels permet alors de comprendre la flexibilité inhérente à ce type de représentation : une strate (définie par une perspective et un format de stockage) peut être recrutée et combinée avec d'autres afin de répondre efficacement à un but, ou une tâche en particulier. La discussion de cette thèse vise à justifier une vision dynamique de la représentation spatiale située et incarnée, dans laquelle le format de stockage de l'information est flexible et dépend des caractéristiques spécifiques de la tâche à accomplir.

8.2.1. Flexibilité représentationnelle : perspectives route et survol

La notion de flexibilité de la représentation a largement été étudiée dans le cadre de la perspective sous laquelle l'information spatiale est stockée. Nous avons pu constater au travers de la revue de littérature que cette question est centrale dans l'étude de la cognition spatiale (voir p. 73). Ceci est particulièrement vrai concernant la distinction entre le format de représentation allocentré ou égocentré : de nombreux éléments empiriques nous permettent de penser que bien que les individus semblent capables de manipuler chaque format en fonction de la tâche à accomplir (Gagnon et al., 2014; Iglói, Zaoui, Berthoz, & Rondi-Reig, 2009; Meilinger, Frankenstein, Simon, Bühlhoff, & Bresciani, 2016; Taylor & Tversky, 1996), ils se distinguent néanmoins par des mécanismes cérébraux (Aguirre & D'Esposito, 1997) ou comportementaux (Pazzaglia & Taylor, 2007; Taylor, Naylor, & Chechile, 1999; Thorndyke & Hayes-Roth, 1982). Nous savons également qu'il existe une importante variabilité interindividuelle en termes de préférence pour l'utilisation d'un certain type de format (Pazzaglia, Cornoldi, & De Beni, 2000). L'existence de préférences individuelles pour un format de représentation a d'importantes implications fonctionnelles sur l'utilisation de la représentation spatiale.

Pazzaglia et Meneghetti (2017) ont publié une analyse factorielle du questionnaire sur les représentations spatiales (QSR, Pazzaglia et al., 2000) que nous avons utilisé au cours de cette thèse. Dans ce travail les auteurs mettent en évidence quatre axes factoriels regroupant différentes sous-échelles du questionnaire ainsi que plusieurs dimensions mesurées par d'autres questionnaires. Ainsi le premier axe regroupe la préférence pour le survol avec le sens de l'orientation global (Hegarty, Richardson, Montello, Lovelace, & Subbiah, 2002), ces deux éléments étant négativement corrélés avec le niveau d'anxiété spatiale (Lawton, 1994). Comme nous l'avons signalé lors de l'étude 2 de cette thèse, ce résultat est particulièrement intéressant puisqu'il permet de comprendre pourquoi les participants s'estimant compétents en termes de capacités spatiales ont semblé moins affectés par le port de poids aux chevilles que ceux ayant des capacités spatiales plus faibles : si la représentation de survol est en moyenne plus facilement utilisée par les participants disposant d'un bon sens de l'orientation, il est plus facile pour ces individus de changer de format de représentation spatiale en réponse à un recalibrage des informations podokinétiques (plutôt associées au format route, voir p. ex. Brunyé, Mahoney, & Taylor, 2010).

Le second axe factoriel contraste les individus en fonction de leur préférence pour l'utilisation des points cardinaux. Ceci est intéressant car la perspective survol n'implique donc pas forcément la prise en compte des points cardinaux, ce qui constitue un argument supplémentaire en faveur de l'abandon d'une vision strictement géographique de la carte cognitive. Les auteurs indiquent cependant que l'utilisation des points cardinaux combinée à la perspective survol conduirait à une évaluation du sens de l'orientation élevée, ainsi qu'à une diminution de l'anxiété spatiale (Pazzaglia & Meneghetti, 2017) : on perçoit bien ici que le niveau de confiance des participants envers leurs capacités spatiales (et éventuellement leurs performances effectives) peut être favorisé par l'utilisation fluide de plusieurs stratégies cohérentes.

Le troisième axe factoriel décrit par ces auteurs réunit les scores de préférence pour les représentations en perspective route et s'appuyant sur les points de repères. Ces deux dimensions sont positivement corrélées, suggérant que la perspective égocentrique bénéficie de l'utilisation des points de repères. Ceci conduit à d'importantes implications concernant la nature des représentations spatiales sous-tendant ce type de perspectives et stratégies : plusieurs auteurs soutiennent que l'information spatiale sous un format de représentation égocentrique peut être résumée par une « description structurelle » [*skeletal description*] d'un trajet sous une forme basique et itérative de segments et points de réorientation (Denis, Pazzaglia, Cornoldi, & Bertolo, 1999). Les points de réorientation dont il est question ici sont les points de repères, qui servent alors à associer une image visuelle à un choix ou une séquence d'actions (Denis, 2017). Ainsi la description d'un trajet sous un format route peut être assimilée à une représentation topographique faite de *edges* et de *nodes* (voir p. 42), mais enrichie de matériels visuels par le biais des points de repères. De plus il a été mentionné précédemment que les descriptions de trajet sous un format route étaient possiblement encodées et rappelées par le biais de la simulation motrice (voir p. 96), qui recrute donc des représentations sensorimotrices sous-tendues par les cortex moteurs (Coello & Delevoye-Turrell, 2007; Jeannerod, 2001). En résumé, la perspective route fait très probablement appel à un ensemble multimodal de formats de représentations parmi lesquelles les informations abstraites et modales sont intégrées.

Dans les études 1 et 3 de la présente thèse, nous avons tenu à recueillir les préférences des individus concernant les formats de représentation route ou survol. Nous pensions en effet que l'impact de ces préférences sur les performances spatiales en fonction de la tâche à

accomplir serait crucial pour la compréhension de la nature multimodale des représentations spatiales. Toutes les études utilisaient des méthodes d'apprentissage spatial en perspective route (en accord avec une vision écologique de la cognition), mais utilisaient à la fois des tâches de rappel spatial impliquant la perspective route ou la perspective survol. Dans l'étude 1, la réussite à une tâche impliquant une perspective de rappel égocentré (tâche de choix de direction) était positivement corrélée avec la préférence pour la perspective route, mais aussi pour le survol. Ceci suggère que les deux perspectives peuvent être efficacement utilisées pour résoudre ce type de tâche. Toutefois, pour la même tâche, aucun effet de la préférence pour ni l'une ni l'autre de ces perspectives n'a été observé dans l'étude 3. Ceci peut être notamment dû au fait que cette tâche a été beaucoup mieux réussie dans l'étude 3 que dans l'étude 1 : l'environnement virtuel utilisé dans l'étude 1 étant moins bien détaillé que dans l'étude 3 il est possible que les photographies issues du premier environnement aient été plus ambiguës (et donc plus difficiles à traiter) que celles de l'environnement plus détaillé. Ceci semble suggérer que le réalisme de l'environnement et la quantité d'informations sur lesquelles les participants peuvent se baser pour mémoriser un lieu impacte les stratégies utilisées lors du rappel : un environnement visuellement et contextuellement appauvri peut requérir une multiplication des perspectives et stratégies à utiliser pour se rappeler convenablement d'un itinéraire. Ceci est probablement également vrai pour les environnements non familiers (Meilinger, Frankenstein, & Bühlhoff, 2013).

Concernant les tâches présentées dans une perspective survol (positionnement de points de repères sur carte), le rôle de chaque perspective est beaucoup plus complexe. En ayant subdivisé la performance de rappel de coordonnées en différentes composantes géométriques, nous avons été en mesure d'observer des corrélations entre différentes préférences pour les perspectives et différentes composantes métriques de la représentation spatiale. Premièrement, l'étude 1 a montré une corrélation positive entre la précision du rappel en termes de distances et d'angles entre les points de repères et la préférence pour la perspective survol. Pour ces mesures, la préférence pour la perspective route ne semble pas affecter les résultats. En revanche, les deux types de préférences sont positivement corrélées avec l'indice de compression globale des distances : utiliser de manière privilégiée le survol ou la route permet ici de moins compresser la représentation spatiale, et donc de tendre vers une échelle plus proche de la réalité. Ceci signifie que les participants ayant tendance à se représenter l'alternance de segments et de réorientations égocentrées pour estimer les distances globales séparant les points de repères ont tendance à moins sous-estimer la taille du lieu lors de cette

tâche (et ce indépendamment du fait d'avoir marché ou non durant l'apprentissage). L'effet facilitateur de la préférence pour le survol s'explique éventuellement par la concordance entre la perspective préférée et celle utilisée lors de la tâche, mais aussi parce que le survol est corrélé avec le sens de l'orientation global (Pazzaglia & Meneghetti, 2017). De plus, il faut souligner ici que l'impact de la perspective route n'est pas le même dans deux facettes de l'estimation de distances : elle ne semble pas faciliter la précision générale de l'estimation de distances locales entre seulement deux points de repères, mais elle facilite la représentation de l'échelle pour l'ensemble du lieu.

Dans un second temps, l'étude 3 a fourni des résultats plus fins concernant l'utilisation des différentes perspectives pour la résolution d'une tâche allocentrée, notamment parce que le réseau routier et l'ampleur du lieu appris étaient très largement supérieurs à ceux de l'étude 1. Plus important encore, nous avons ici choisi une méthode d'analyse plus fine que celle précédemment utilisée : en utilisant des modèles de régression multiple mixtes, nous avons pu observer l'effet de la préférence pour le survol ou la route indépendamment des capacités spatiales globales, afin notamment de pouvoir dissocier la préférence pour le survol du sens de l'orientation global (Pazzaglia & Meneghetti, 2017). Ainsi, lorsque les disparités de capacités spatiales sont neutralisées par le modèle statistique, seule la préférence pour la perspective route semble influencer les mesures de corrélation et de précision angulaire (lors de la tâche de positionnement de points de repères sur cartes), pour l'expérience 1. La précision angulaire étant liée à la précision du placement des points de repères les uns par rapport aux autres, elle varie parallèlement à la corrélation, qui décrit le lien entre la forme globale des coordonnées rappelées et la forme globale des coordonnées de référence. Il est donc possible de se demander pourquoi le format de représentation en perspective survol n'est pas corrélé à ces deux mesures, puisque ce type de représentation est supposé capturer l'organisation du lieu.

L'absence de lien entre préférence pour le survol et précision métrique est probablement due à la spécificité de l'expérience 1 de l'étude 3 : la transgression de l'effort physique anticipé pour gravir les pentes montantes. Les participants préférant la perspective survol sont plus négativement affectés par des informations spatiales de mauvaise qualité (Denis et al., 1999), probablement en raison de la rigidité de la représentation « cartographique » qu'ils produisent de l'espace. Il est alors possible d'imaginer que la transgression du lien entre informations podokinétiques et visuelles dans l'expérience 1 s'est traduit par une information

spatiale erronée, aboutissant à la disparition d'un éventuel effet facilitateur de la préférence pour la perspective survol. Cette conclusion est appuyée par le fait que l'effet positif de la préférence pour le survol réapparaît dans l'expérience 2 de l'étude 3 (transgression perceptivo-motrice résolue par le port de poids), pour toutes les mesures, au détriment de la préférence pour la perspective route. Dans cette situation, la disparition de l'effet de la préférence route sur les mesures de corrélation et de précision angulaire nous informe que la perspective route n'est plus forcément utilisée lorsque la perspective survol est disponible : un lieu à grande-échelle nécessite en effet l'acquisition d'une connaissance topologique de survol pour être correctement mémorisé dans son ensemble (Chrastil & Warren, 2013).

Malgré la complexité des différentes tendances observées au cours de nos études concernant la préférence pour les perspectives route et survol, il est possible de synthétiser l'ensemble des observations de la manière suivante : la variabilité de l'effet des préférences pour un type de perspective reflète la flexibilité des individus dans le traitement de l'information spatiale. D'après nos résultats, il semble en effet que cet effet varie en fonction de la tâche à accomplir, et en particulier des caractéristiques sensorimotrices de l'apprentissage (marche, poids aux chevilles, pentes etc...). De plus, la préférence pour une perspective cohérente avec la tâche de rappel n'est pas toujours liée à de meilleurs résultats. Ceci semble suggérer que le rappel de la représentation spatiale, quelle que soit la tâche grâce à laquelle il s'effectue, est susceptible de mobiliser différentes perspectives. Cette flexibilité représentationnelle est prévue par un modèle constructiviste de la représentation spatiale située et incarnée tel que le collage spatial (Tversky, 1993, 2003), dans lequel toutes les perspectives coexistent dans différentes couches de formats représentationnels. Cette idée a reçu plusieurs validations empiriques : par exemple, Noordzij et Postma (2005) ont fait apprendre à des participants des textes en perspective survol ou route, puis ont testé les propriétés métriques de la représentation spatiale créée à partir du texte par des tâches de reconnaissance ou comparaison de distances. Les résultats de cette étude n'ont montré aucune différence entre les deux textes dans la précision des réponses métriques, suggérant que les deux types de perspectives contiennent suffisamment d'informations pour inférer des propriétés métriques correctes. Il s'agit aussi d'une démonstration du fait qu'une représentation allocentrée peut être construite à partir d'une description égocentrée du lieu (Noordzij & Postma, 2005), et qu'une perspective utilisée lors de l'apprentissage peut être remplacée par d'autres modèles créés selon la tâche à accomplir (Taylor & Tversky, 1992). Toutefois il a été également montré que la flexibilité entre deux perspectives n'est pas

automatique. Basculer entre les deux perspectives requiert en effet la mobilisation de ressources cognitives, et les deux directions ne sont pas forcément équivalentes : passer d'une représentation initiale égocentrée à une représentation allocentrée semble nécessiter plus de temps d'exposition (Brunyé & Taylor, 2008; Lee & Tversky, 2005; Noordzij, Zuidhoek, & Postma, 2006) et plus de ressources computationnelles (Brunyé, Rapp, & Taylor, 2008), en particulier concernant la composante visuo-spatiale en mémoire de travail (De Beni, Pazzaglia, Gyselinck, & Meneghetti, 2005; Gyselinck, De Beni, Pazzaglia, Meneghetti, & Mondoloni, 2007; Pazzaglia, De Beni, & Meneghetti, 2007). Il faut ici souligner que ces études ont considéré un cas particulier de l'apprentissage spatial, la compréhension de textes spatiaux. Cette forme d'acquisition d'information spatiale est probablement différent de celui étudié dans cette thèse, puisque nous avons choisi d'utiliser des situations d'apprentissage ressemblant à la réalité quotidienne (navigation active égocentrée). Il semblerait donc que, dans des situations plus écologiques, les perspectives route et survol soient plus facilement interchangeables en fonction de la tâche à accomplir, malgré la perspective initiale d'acquisition de l'information (étude 1, étude 3, voir aussi p. ex. Iglói et al., 2009, H. A. Taylor et al., 1999).

8.2.2. Formats et valeur fonctionnelle des représentations spatiales

L'idée d'une seule représentation associée à un lieu n'est absolument pas justifiée par l'expérience dont nous disposons au quotidien. Il est aisé de comprendre ceci en se prêtant à une rapide expérience de pensée. Nous demandons au lecteur de se figurer un lieu familier tel que son propre appartement ou sa propre maison : où sont rangées les fourchettes ? Quelle est la superficie totale ? Quel est votre endroit préféré ? Quelle est la pièce la plus au Nord ? Afin de répondre le mieux possible à chacune de ces questions, il est nécessaire de faire appel à une connaissance spatiale traitant d'un même lieu, mais à chaque fois sous un format différent. Ce format dépend en majeure partie de la façon dont nous interagissons avec le concept en question. L'expérience quotidienne à laquelle est empiriquement liée le concept de « fourchettes » dans ce cas est l'activité de saisie motrice, définie par une activation musculaire, un retour sensoriel et une conséquence visible sur l'environnement : il est probable que répondre à cette question nécessite la reviviscence d'un mouvement spatialisé permettant de faire émerger l'idée que les fourchettes se situent dans un tiroir, à une certaine hauteur, d'un certain côté de la cuisine. Ici la modalité sensorimotrice est tout simplement

pertinente pour répondre à la question, en plus d'être potentialisée par l'expérience. Cependant ce format de représentation n'est absolument pas utile à la récupération de l'information de superficie, qui quant à elle est probablement une abstraction sémantisée et décontextualisée, n'étant pas forcément reliée à une expérience empirique. Afin de répondre à la question de l'endroit préféré, il est pertinent de recruter des souvenirs épisodiques spécifiquement localisés. Afin de répondre à la dernière question, il est probablement pertinent d'avoir recours à une sorte de carte cognitive positionnant le lieu en référence avec son contexte géographique. Chacune de ces questions est une tâche particulière, orientant les stratégies conscientes ou non déployées par l'individu pour la résoudre.

De nombreux arguments expérimentaux attestent de la flexibilité des perspectives. Concernant la flexibilité représentationnelle, en termes de formats d'information, de nombreuses observations suggèrent que l'information spatiale bien que majoritairement recueillie par le biais de la vision, peut également être intégrée et reconstruite en l'absence de vision au travers d'une variété d'autres modalités sensorielles : l'audition (Klatzky, Marston, Giudice, Golledge, & Loomis, 2006; Loomis, Lippa, Klatzky, & Golledge, 2002), l'olfaction (Porter, Anand, Johnson, Khan, & Sobel, 2005), le langage (Avraamides, Loomis, Klatzky, & Golledge, 2004) et bien entendu l'information sensorimotrice podokinétique (Afonso et al., 2010; Klatzky et al., 1990; Loomis et al., 1993). Toutefois la capacité à créer des représentations en l'absence de vision interroge : la représentation découlant de ce type d'apprentissage est-elle convertie en format amodal (une carte cognitive) ou est-elle totalement analogue à l'expérience vécue du lieu, c'est-à-dire une chaîne de réactivations sensorielles séquentielles ? Dans la seconde alternative, le concept de représentation n'est plus nécessaire puisque le lieu est encodé sous la forme de multiples simulations corticales.

A partir des travaux de cette thèse et des observations rapportées dans la littérature, nous proposons une approche intégrative modérée : les représentations sous forme de collage spatial intègreraient aussi bien des strates dont le format d'information est amodal (p. ex. cartes cognitives et schémas topologiques), que des strates sensorielles accessibles par l'imagerie mentale (p. ex. images de lieu dépendant d'une perspective et de séquences autobiographiques liée à un itinéraire emprunté). Ces différentes strates seraient dynamiquement liées (leurs propriétés sont déformées par l'influence des autres strates) par le biais de symboles perceptifs communs (Barsalou, 1999) à partir desquelles le concept émergerait via des mécanismes de simulation (Barsalou, 2008; Coello & Delevoeye-Turrell,

2007; Versace et al., 2014). Une telle vision ne rejette donc pas totalement les approches computationnelles de la représentation spatiale car la carte cognitive ou le schéma topologique seront des formats de représentation particulièrement adaptés à un type de tâche en particulier. Elle ne rejette pas non plus les postulats de la cognition incarnée puisque les informations multimodales sont en interaction constante avec les concepts amodaux et en modifient continuellement les propriétés. Cependant, cette conception des représentations spatiales est incompatible avec la vision modulariste des processus cognitifs (Fodor, 1983), et rejette l'idée d'indépendance entre les processus perceptifs et la cognition (Marr, 1982) : les représentations sont actualisées en temps réel par l'expérience vécue en interaction avec l'environnement, selon une approche constructiviste (Tversky, 1993).

Dans cette optique et en référence à l'approche expérimentale utilisée dans cette thèse, les distorsions métriques observées lors du rappel de la représentation spatiale témoignent de la complexité des processus d'intégration multimodale aboutissant à la réponse comportementale (Wolbers & Hegarty, 2010). Ces déformations de l'espace en mémoire remplissent un rôle fonctionnel : ainsi que le décrit Montello (2009), les représentations de l'espace et en particulier des distances servent en premier lieu à estimer les coûts (physiques ou matériels) relatifs à un déplacement (Montello, 1997), une notion cohérente avec l'approche *action-specific* de la perception (Proffitt, 2006) et que l'on retrouve dans d'autres domaines tels que la géographie (« *the first law of geography* », Sui, 2004; Tobler, 1970). En accord avec les théories constructivistes de la représentation spatiale, Montello admet trois sources d'acquisition d'information spatiale : les caractéristiques environnementales (principalement perçues visuellement mais également multimodales), les temps de navigation et l'effort ou les ressources dépensées lors de la navigation (Montello, 2009). Il propose ensuite un modèle permettant d'expliquer comment sont encodées et rappelées les informations de distances en mémoire, et quels sont les mécanismes utilisés pour faire émerger une connaissance spatiale utilisable (voir *Figure 46*). Dans ce modèle, l'intégration multimodale d'informations liées à l'effort est centrale puisqu'un grand nombre de situations d'apprentissage spatial conduit à l'utilisation d'heuristiques temps/effort pour générer la connaissance métrique.

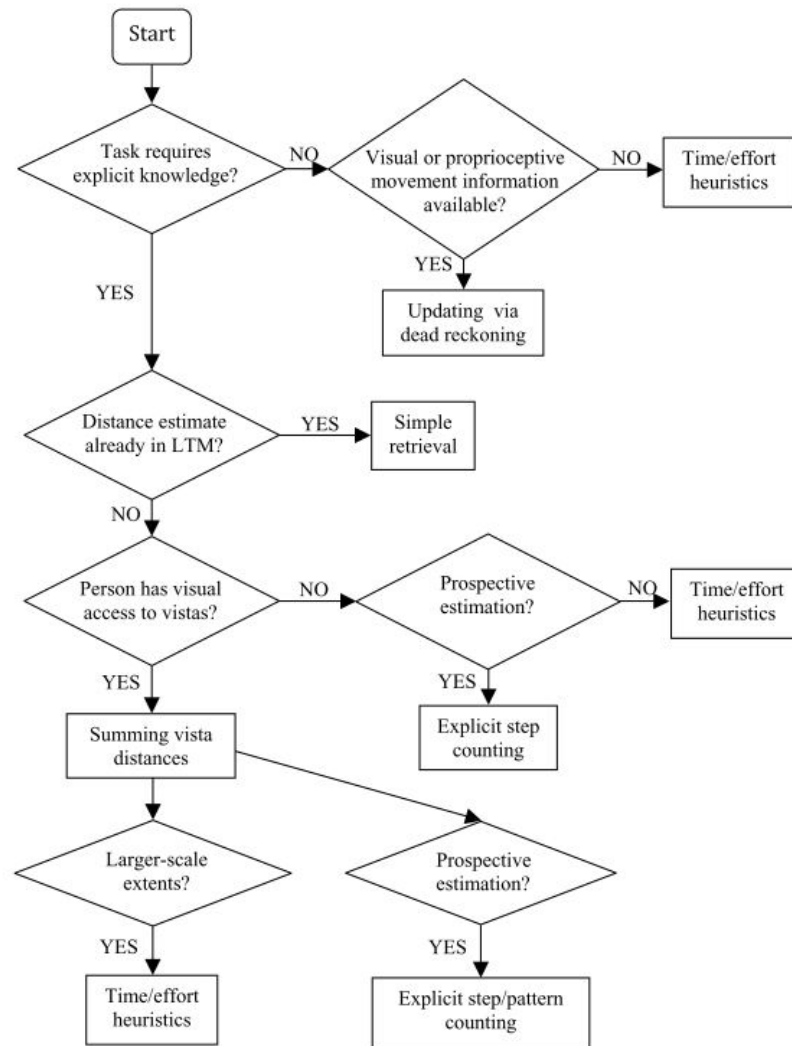


Figure 46 – Modèle des sources multimodales et processus utilisés lors de la perception et le rappel d'informations spatiales liées à la distance (tiré de Montello, 2009, p. 10)

Ce modèle complète efficacement les modèles de catégorisation de l'espace (Coello & Delevoye-Turrell, 2007; Friston, 2012; Gibson, 1979) et d'optimisation des coûts et bénéfices énergétiques (Proffitt, 2006; White, Shockley, & Riley, 2013) pour expliquer les distorsions métriques liées à l'action motrice lors de l'apprentissage. En résumé, l'ensemble des réflexions et des observations empiriques présentées au cours de cette thèse convergent en faveur de l'idée que les représentations spatiales en mémoire ont pour fonction la préparation à l'action (Franklin & Tversky, 1990; Glenberg, 1997), en interaction avec le contexte environnemental (Barsalou, 2008) et les caractéristiques de la tâche à réaliser (Hommel, 2017; Montello, 2009) dans un but adaptatif (Sternberg, 1988).

Ce point de vue est résumé par Barbara Tversky (2009) ainsi :

*Spatial thinking comes from and is shaped by perceiving the world and acting in it, be it through learning or through evolution. The embodied and situated cognitive structures and biases of thought about space and about action limit and bias abstract thought as well. Thought is grounded in the world and in the body*¹³. (Tversky, 2009, p. 213)

8.2.3. Le rôle de la simulation : limites et ouvertures

Selon le modèle Act-In (Versace et al., 2014), les traces mnésiques conservent les propriétés sensorielles telles que captées par les récepteurs modaux durant l'apprentissage. Ces propriétés sont statistiquement plus saillantes lors du rappel d'informations en mémoire quand l'apprentissage ou le rappel est particulièrement coûteux en termes de ressources cognitives (Hommel, 2017). La saillance des propriétés sensorielles de la trace se manifeste alors par le biais d'un mécanisme de simulation permettant la reviviscence des sensations modales en lien avec l'expérience originale (Barsalou, 2003, 2008; Jeannerod, 2001). Si la construction et la récupération de la représentation spatiale sous-tend la préparation à l'action, alors le rappel de lieux complexes appris par le biais de la locomotion active devrait aider à coupler des strates de représentation métriques avec des simulations sensorielles pour contribuer à faire émerger le concept de distance parcourue (en complément d'autres informations telles que les informations visuelles). Dans nos études, nous avons pu constater que des différences d'activités motrices (de marche, ou de saisie manuelle) amenaient des distorsions systématiques lors du rappel de propriétés métriques globales du lieu. Nous avons également pu constater des effets complexes du recalibrage de l'effort de marche sur les temps de planification d'itinéraires en fonction des capacités spatiales des individus. Ces résultats ont été interprétés comme de possibles indices d'existence de simulation motrice lors du rappel de propriétés métriques spatiales. Toutefois il nous faut nuancer ce propos : les distorsions métriques peuvent en effet être simplement dues à des déformations enregistrées en mémoire mais issues de l'étape perceptive. Par exemple, nous avons pu voir grâce à l'étude 3 que des processus d'inférences proprioceptives agissant durant l'apprentissage

¹³ “La pensée spatiale vient de et est modelée par la perception du monde et le fait d'agir en son sein, que ce soit à travers l'apprentissage ou l'évolution. Les structures cognitives incarnées et situées, les biais de pensée à propos de l'espace, des limites d'action, ou de la pensée abstraite le sont également. La pensée trouve son fondement dans le monde et dans le corps.” [traduction libre]

pouvaient aussi provoquer des déformations métriques prédites par les théories du codage prédictif (Friston, 2005, 2012; Rao & Ballard, 1999).

Afin de continuer à investiguer l'idée selon laquelle la simulation sensorimotrice des paramètres liés à l'action durant l'apprentissage du lieu module le rappel des propriétés métriques de la représentation, il nous faudrait employer des méthodes permettant d'observer plus directement des marqueurs d'activation motrice. La plupart des études testant l'existence de mécanismes de simulation motrice pour le rappel de concepts ont utilisé des paradigmes d'amorçage ou d'interférence posturale (voir Dutriaux, 2016, pour une revue sur la question). Par exemple, il a été montré que l'adoption d'une posture congruente facilitait le rappel de souvenirs épisodiques liés (p. ex. rappeler un souvenir sportif en adoptant une posture associée à l'activité en particulier, Dijkstra, Kaschak, & Zwaan, 2007). À l'inverse, adopter une posture interférant avec l'action de saisie (p. ex. mains jointes dans le dos) détériore le rappel de mots désignant des objets manipulables (Dutriaux & Gyselinck, 2016). Ces résultats suggèrent que la réactivation d'une composante motrice pertinente associée à un concept est au moins partiellement mobilisée lors du rappel par un mécanisme de simulation motrice, et qu'il est possible de faciliter ou de détériorer cette simulation par le biais de l'activité motrice lors de la phase de récupération de l'information.

Dans le cadre du traitement de l'information spatiale, nous ne disposons que de peu de mises en évidence de ce phénomène. Compte tenu de la complexité de l'intégration motrice dans la représentation spatiale, ces arguments sont souvent indirects, à l'image des effets de compatibilité d'action directionnels observés lors du rappel d'éléments spatiaux égocentrés (Wang, Taylor, & Brunyé, 2012, 2018). Dans cet exemple décrit précédemment (voir partie « *Accessibilité, gestes et mémoire* » p. 109), les auteurs observent que le rappel d'éléments spatiaux placés à droite ou à gauche de l'observateur lors de l'apprentissage implique une déviation des trajectoires motrices du côté correspondant lors d'une tâche de rappel spatial. Or cette déviation directionnelle implique en elle-même une traduction de l'information spatiale, une sorte de symbolisme moteur indirect analogue aux comportements gestuels observés lors de la compréhension et le rappel spatial (Hostetter & Alibali, 2008; Jamalian, Giardino, & Tversky, 2013) ; il s'agit donc ici d'une possible observation de symboles moteurs reflétant probablement des stratégies et non des propriétés empiriquement vécues lors de l'apprentissage et amorcée par la représentation. De même, l'influence du rythme d'un bruit de pas entendu lors de la lecture de textes spatiaux en perspective égocentrée sur la vitesse de

lecture et le rappel de distance (Brunyé, Mahoney, & Taylor, 2010) constitue un argument en faveur de l'existence d'un éventuel processus d'imagerie mentale motrice ; une stratégie pertinente pour la compréhension et non une réelle simulation de paramètres empiriques. Il a d'ailleurs été proposé que les gestes moteurs étaient amorcés lors du rappel spatial à des fins de communication ou de maintien de l'imagerie mentale en mémoire de travail (Wesp, Hesse, Keutmann, & Wheaton, 2001), et non comme des simulations de propriétés empiriques issues de l'expérience réelle.

A partir des travaux de cette thèse, nous ne disposons que d'indices comportementaux pour affirmer que les informations sensorimotrices expérimentées lors de l'encodage ont un effet sur les propriétés métriques de la représentation en mémoire. Nous ne pouvons pas affirmer dans l'état actuel de nos connaissances que cet effet se manifeste par le biais de la reviviscence des informations sensorimotrices lors de la récupération. Par exemple, l'étude 1 nous a montré que marcher durant le rappel de la représentation spatiale ne conduisait pas à de plus mauvaises performances que le fait de ne pas marcher : la marche réelle n'interférerait (ou n'amorcerait) donc pas avec un mécanisme de simulation des informations podokinétiques lors du rappel ? Cette absence d'effet peut être interprétée comme un indice d'absence de simulation motrice podokinétique lors du rappel, ou comme suggérant que les paramètres de la simulation et de la marche réelle ne sont pas suffisamment semblables pour s'interférer mutuellement (en désaccord avec les résultats classiques, voir p. ex. Jeannerod, 2001). Une piste de résolution de cette question peut être fournie par la neuroimagerie, et l'étude des réseaux neuronaux dédiés à l'intégration sensorimotrice de l'information spatiale (voir p. ex. T. Hartley, Lever, Burgess, & O'Keefe, 2013; Taube, 2007).

8.2.4. De la géométrie des espaces mentaux

Le concept de représentations mentales multimodales dirigées vers l'action implique forcément l'abandon du postulat d'isomorphisme, puisque c'est en observant les déformations systématiques de la représentation (Tversky, 2009) que nous pouvons conclure à l'existence de biais liés notamment à l'optimisation des coûts énergétiques. De plus, le concept de collage cognitif implique l'impossibilité de se représenter l'espace en mémoire en ayant recours à la géométrie euclidienne : les déformations opérées dans les propriétés métriques ne semblent pas suivre les axiomes de la géométrie euclidienne mais plutôt refléter des biais non spatiaux (voir p. ex. Brunyé, Gardony, et al., 2012; Maddox et al., 2008) conduisant à la production de

figures impossibles (voir distorsions des propriétés métriques en mémoire, p. 40). Bien que les représentations géométriques euclidiennes de l'espace semblent intuitivement plus faciles à déchiffrer (Bertalanffy, 1971), il n'y a pourtant aucune raison fonctionnellement valable que les représentations mentales soient également euclidiennes. Par exemple, une représentation euclidienne analogue à un plan ne pourrait exister qu'en deux dimensions, car les diagrammes tridimensionnels sont plus difficiles à comprendre et nécessitent plus de ressources de traitement (Gobert, 1999). De plus, les cartes omettent un grand nombre d'informations spatiales (Tversky, 2000) ou les déforment par essence (Borges, 1998). Ainsi la géométrie euclidienne ne peut être utile qu'à représenter seulement quelques propriétés de l'espace, notamment à des fins de communication (Denis, 2017; Tversky, 2000), mais ne reflète pas efficacement l'intégralité des informations spatiales disponibles.

Des travaux récents ont d'ailleurs permis d'affirmer que les espaces non euclidiens étaient parfaitement intégrés par les individus lors de tâches de navigation : Warren et al. (2017) ont demandé à des participants d'apprendre un labyrinthe virtuel dans lequel avaient été placés des « trous de vers » artificiels. Ces trous de vers téléportaient les participants et leur faisaient opérer une rotation afin qu'ils se retrouvent à un autre endroit du labyrinthe comme s'ils avaient traversé un raccourci de l'espace. Les participants devaient ensuite planifier et parcourir des trajets entre différents points de repères. Les résultats de cette étude ont montré que des trajets comportant des trous de vers étaient majoritairement sélectionnés par les participants. Dans une seconde étude, la comparaison de dessins de cartes de participants ayant exécuté la tâche dans un environnement euclidien ou dans l'environnement non euclidien a montré une intégration automatique des violations de la géométrie dans le second cas : les participants ayant appris l'environnement non euclidien semblent intégrer automatiquement et en l'absence totale de conscience des violations métriques, traduisant des « courbures » ou des « déchirures » de l'espace (Warren et al., 2017).

Ces résultats semblent indiquer que la représentation spatiale sous-jacente construite à partir de ce type d'expérience spatiale est non euclidienne, mais aussi qu'elle n'est pas assez différente de représentations créées à partir de l'environnement réel pour que les participants puissent remarquer les violations de géométrie. Cette idée est confirmée par plusieurs études en réalité virtuelle montrant que les environnements violant des propriétés euclidiennes liées aux régularités angulaires (Zetsche et al., 2009) ou à la continuité topologique (Kluss, Marsh, Zetsche, & Schill, 2015) n'affectent pas les capacités des participants à générer des

raccourcis ou estimer correctement des distances. Enfin, il a également été montré que la perception directe de configurations spatiales ne respectait pas les lois de la géométrie euclidienne (Todd, Oomes, Koenderink, & Kappers, 2001), et ce notamment à cause de biais liés à l'anticipation d'effort physique déjà décrits précédemment (p. ex. Stefanucci et al., 2005). Aussi stimulants que ces résultats puissent être, ils ne font en définitive que témoigner du fait que l'humain semble s'adapter correctement à son milieu : selon la théorie de la relativité générale, l'espace physique ne peut être réduit à un système de coordonnées cartésiennes opérant dans une géométrie euclidienne, mais est mieux décrit par le biais de coordonnées gaussiennes non euclidiennes (Einstein, 1920). Il n'est absolument pas paradoxal que l'humain puisse naviguer correctement dans un environnement non euclidien si son milieu d'origine n'est finalement pas gouverné par les axiomes stricts de la géométrie euclidienne.

8.2.5. En conclusion : la nécessité d'une approche centrée sur la tâche

Adopter une approche intégrative de la représentation nécessite de considérer que les paramètres de la représentation évoluent dynamiquement en fonction d'un grand nombre de facteurs. Parmi ces facteurs, nous avons pu mentionner en guise d'exemples les perspectives et les modalités sensorielles par lesquelles l'information spatiale est traitée lors de l'apprentissage, mais aussi les caractéristiques individuelles propres à chaque individu ou encore l'échelle du lieu à apprendre. Les demandes spécifiques de la tâche à accomplir sont également déterminantes dans la sélection des propriétés de la représentation nécessaire à exécuter la tâche : si les informations liées au corps semblent suffisamment pertinentes dans le cadre de l'apprentissage actif de lieux pour influencer la précision des propriétés métriques de la représentation, cette contribution existe-t-elle toujours dans d'autres contextes ? Par exemple, la contribution des informations podokinétiques aux performances de rappel spatial existe-t-elle toujours lors de tâches de planification libre, de pointage égocentré, de génération de descriptions langagières ? La taille de l'effet serait-elle plus importante que celle observée dans nos protocoles ? Il semble important pour les études futures de recentrer les recherches sur les paramètres de la tâche à accomplir, afin d'aboutir progressivement à un modèle de la représentation spatiale qui aurait pour but de prédire les paramètres de la représentation construite en mémoire selon les caractéristiques de la tâche et des contextes. Pour ce faire, de nombreuses questions doivent-être adressées, parmi lesquelles nous pouvons mentionner la

question de la causalité des effets liés à l'action en mémoire (effets « top-down » reflétant un jugement *a posteriori*, ou effet « bottom-up » pour lequel l'environnement et la tâche conditionnent la création d'une représentation adaptée ? Voir p. ex. Firestone & Scholl, 2016). De la même manière, il nous faudra mieux quantifier les différentes contributions multimodales afin de comprendre pourquoi une modalité devient « pertinente » dans la résolution d'une tâche en particulier.

L'idée générale est donc qu'une représentation mentale est adaptée à son objet et à la tâche à effectuer, ce qui rejoint les définitions plus fonctionnelles de la cognition comme visant à la production de comportements adaptés au milieu (Sternberg, 1988). Le milieu en question étant infiniment complexe et multidimensionnel, le défi futur des prochaines recherches dans le domaine de la représentation spatiale semble être de formuler des modèles compréhensibles pouvant rendre compte des multiples sources de variations pouvant opérer sur le traitement de l'information spatiale (voir p. 78). Pour ce faire, il semble important d'adopter des méthodes modernes capables de tester de tels modèles. Par exemple, nous pouvons citer les techniques de modélisation par algorithmes (*machine learning*) couramment utilisées en astronomie afin de tester des modèles théoriques complexes tels que les modèles traitant de l'évolution de l'univers (voir p. ex. Kremer, Stensbo-Smidt, Gieseke, Pedersen, & Igel, 2017). Ces outils, bien que constituant la suite logique des approches computationnelles de la psychologie cognitive, ont été rarement utilisés dans le domaine de la représentation spatiale (voir p. ex. Kuipers, 2000) et devraient constituer aujourd'hui un défi scientifique prioritaire de l'étude d'entités aussi complexes que les représentations spatiales (Kelleher & Dobnik, 2018).

9. BIBLIOGRAPHIE

- Aarts, A., & Lin, S. (2015). Estimating the reproducibility of psychological science. *Science*, 349(6251), 943–950.
- Afonso, A., Blum, A., Katz, B. F. G., Tarroux, P. E., Borst, G., & Denis, M. (2010). Structural properties of spatial representations in blind people: Scanning images constructed from haptic exploration or from locomotion in a 3-D audio virtual environment. *Memory and Cognition*, 38(5), 591–604. <https://doi.org/10.3758/MC.38.5.591>
- Aguirre, G. K., & D'Esposito, M. (1997). Environmental Knowledge Is Subserved by Separable Dorsal/Ventral Neural Areas. *The Journal of Neuroscience*, 17(7), 2512–2518. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.17-07-02512.1997>
- Ahmetovic, D., Gleason, C., Ruan, C., Kitani, K., Takagi, H., & Asakawa, C. (2016). NavCog: A navigational cognitive assistant for the blind. *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI 2016*, (September), 90–99. <https://doi.org/10.1145/2935334.2935361>
- Allen, G. L., Kirasic, K. C., Dobson, S. H., Long, R. G., & Beck, S. (1996). Predicting environmental learning from spatial abilities: An indirect route. *Intelligence*, 22(3), 327–355.
- Andler, D. (1987). Progrès en situation d'incertitude. *Le Débat*, (47), 5–25.
- Araújo, D., Davids, K., & Passos, P. (2007). Ecological validity, representative design, and correspondence between experimental task constraints and behavioral setting: Comment on Rogers, Kadar, and Costall (2005). *Ecological Psychology*, 19(1), 69–78. <https://doi.org/10.1080/10407410709336951>
- Arbib, M. A. (2005). From monkey-like action recognition to human language: An evolutionary framework for neurolinguistics. *Behavioral and Brain Sciences*, 28, 105–167. <https://doi.org/10.1017/s0140525x05390030>
- Armbrüster, C., Wolter, M., Kuhlen, T., Spijkers, W., & Fimm, B. (2008). Depth perception

- in virtual reality: Distance estimations in peri- and extrapersonal space. *Cyberpsychology and Behavior*, 11(1), 9–15. <https://doi.org/10.1089/cpb.2007.9935>
- Auvray, M., Hanne-ton, S., & O'Regan, J. K. (2007). Learning to perceive with a visuo-auditory substitution system: Localisation and object recognition with “The vOICe.” *Perception*, 36(3), 416–430. <https://doi.org/10.1068/p5631>
- Avraamides, M. N., Loomis, J., Klatzky, R. L., & Golledge, R. G. (2004). Functional equivalence of spatial representations derived from vision and language: Evidence from allocentric judgments. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, 30(4), 801–814. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.30.4.804>
- Baars, B. J. (1986). *The cognitive revolution in psychology*. New York: Guilford Press.
- Baggett, P. (1984). Role of temporal overlap of visual and auditory material in forming dual media associations. *Journal of Educational Psychology*, 76(3), 408–418.
- Baird, J. C. (1979). Studies of the cognitive representation of spatial relations: I. Overview. *Journal of Experimental Psychology: General*, 108(1), 90–91.
- Baird, J. C., Wagner, M., & Noma, E. (1982). Impossible Cognitive Spaces. *Geographical Analysis*, 14(3), 204–216. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1982.tb00069.x>
- Banton, T., Stefanucci, J. K., Durgin, F. H., Fass, A., & Proffitt, D. R. (2005). The Perception Of Walking Speed In A Virtual Environment, *14(4)*, 394–406.
- Barsalou, L. W. (1999). Perceptual symbol systems. *Behavioral and Brain Sciences*, 22(4), 637-660.
- Barsalou, L. W. (2003). Situated simulation in the human conceptual system. *Language and Cognitive Processes*, 18(5–6), 513–562. <https://doi.org/10.1080/01690960344000026>
- Barsalou, L. W. (2008). Grounded Cognition. *Annual Review of Psychology*, 59(1), 617–645. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093639>
- Barsalou, L. W., Niedenthal, P. M., Barbey, A. K., & Ruppert, J. A. (2003). Social Embodiment. In B. H. Ross (Ed.), *The Psychology of Learning and Motivation* (pp. 43–92). London: Academic Press.
- Barsalou, L. W., & Wiemer-Hastings, K. (2005). Situating abstract concepts. In R. A. Zwaan

- (Ed.), *Grounding Cognition: The Role of Perception and Action in Memory, Language, and Thinking* (pp. 129–163). New York: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511499968.007>
- Barsalou, L. W., Yeh, W., Luka, B. J., Olseth, K. L., Mix, K. S., & Wu, L. (1993). Concepts and Meaning. In *Chicago Linguistic Society 29: Papers From the Parasession on Conceptual Representations* (pp. 23–61).
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. M., & Walker, S. (2015). “Fitting Linear Mixed-Effects Models using lme4.” Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1406.5823>.
- Baum, D. R., & Jonides, J. (1979). Cognitive maps: Analysis of comparative judgments of distance. *Memory & Cognition*, 7(6), 462–468. <https://doi.org/10.3758/BF03198262>
- Beals, R., Krantz, D. H., & Tversky, A. (1968). Foundations of multidimensional scaling. *Psychological Review*, 75(2), 127.
- Bem, S. L. (1981). Gender schema theory: a cognitive account of sex typing. *Psychological Review*, 88(4), 354–364.
- Bergh, U., & Ekblom, B. (1979). Physical performance and peak aerobic power at different body temperatures. *Journal of Applied Physiology*, 46(5), 885–889. <https://doi.org/10.1152/jappl.1979.46.5.885>
- Berkeley, G. (2002). *An essay towards a new theory of vision*. (D. R. Wilkins, Ed.). Dublin: Aaron Rhames.
- Bertalanffy, L. V. (1971). *General system theory*. Harmondsworth: Penguin Books.
- Berti, A., & Frassinetti, francesca. (1996). When Far Becomes Near : Remapping of Space. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(3), 415–420.
- Bhalla, M., & Proffitt, D. R. (1999). Visual-motor recalibration in geographical slant perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25(4), 1076–1096.
- Blaut, J. M., McCleary, G. F., & Blaut, A. S. (1970). Environmental mapping in young children. *Environment and Behavior*, 2(3), 335–349.
- Bohannon, R. W., & Andrews, W. A. (2011). Normal walking speed: A descriptive meta-

- analysis. *Physiotherapy*, 97(3), 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.physio.2010.12.004>
- Bollen, K. A., & Jackman, R. W. (1990). Regression diagnostics: An expository treatment of outliers and influential case. In J. Fox & J. S. Long (Eds.), *Modern Methods of Data Analysis* (pp. 257–91). Newbury Park: Sage.
- Borges, J. L. (1998). *On the exactitude of science. Collected Fictions*. New York: Penguin.
- Bourbakis, N. (2008). Sensing surrounding 3-D space for navigation of the blind. A prototype system featuring vibration arrays and data fusion provides a near real-time feedback. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine: The Quarterly Magazine of the Engineering in Medicine & Biology Society*, 27(1), 49–55. <https://doi.org/10.1109/MEMB.2007.901780>
- Bourgeois, J., Farnè, A., & Coello, Y. (2014). Costs and benefits of tool-use on the perception of reachable space. *Acta Psychologica*, 148, 91–95. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2014.01.008>
- Bowers, D., & Heilman, K. M. (1980). Pseudoneglect: effects of hemispace on a tactile line bisection task. *Neuropsychologia*, 18(4), 491–498.
- Bruner, J. S. (1957). Going beyond the information given. In J. S. Bruner, E. Brunswik, L. Festinger, F. Heider, K. F. Muenzinger, C. E. Osgood, & D. Rapaport (Eds.), *Contemporary approaches to cognition* (pp. 41–69). Cambridge: Harvard University Press.
- Brunyé, T. T., Andonova, E., Meneghetti, C., Noordzij, M. L., Pazzaglia, F., Wienemann, R., ... Taylor, H. a. (2012). Planning routes around the world: International evidence for southern route preferences. *Journal of Environmental Psychology*, 32(4), 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2012.05.003>
- Brunyé, T. T., Gagnon, S. A., Waller, D., Hodgson, E., Tower-Richardi, S. M., & Taylor, H. A. (2012). Up North and Down South: Implicit Associations Between Topography and Cardinal Direction. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 65(10), 1880-1894.
- Brunyé, T. T., Gardony, A. L., Mahoney, C. R., & Taylor, H. A. (2012). Body-specific representations of spatial location. *Cognition*, 123(2), 229–239. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2011.07.013>

- Brunyé, T. T., Haga, Z., Houck, L., & Taylor, H. A. (2017). "You look lost: Understanding uncertainty and representational flexibility in navigation." In J. M. Zacks & H. A. Taylor (Eds.), *Representations in Mind and World. Essays inspired by Barbara Tversky* (pp. 42–56). New York: Routledge.
- Brunyé, T. T., Mahoney, C. R., Gardony, A. L., & Taylor, H. A. (2010). North is up(hill): Route planning heuristics in real-world environments. *Memory & Cognition*, *38*(6), 700–712. <https://doi.org/10.3758/MC.38.6.700>
- Brunyé, T. T., Mahoney, C. R., & Taylor, H. a. (2010). Moving through imagined space: Mentally simulating locomotion during spatial description reading. *Acta Psychologica*, *134*(1), 110–124. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.01.003>
- Brunyé, T. T., Rapp, D. N., & Taylor, H. A. (2008). Representational flexibility and specificity following spatial descriptions of real-world environments. *Cognition*, *108*(2), 418–443. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.03.005>
- Brunyé, T. T., & Taylor, H. A. (2008a). Extended experience benefits spatial mental model development with route but not survey descriptions. *Acta Psychologica*, *127*(2), 340–354. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2007.07.002>
- Brunyé, T. T., & Taylor, H. A. (2008b). Working memory in developing and applying mental models from spatial descriptions. *Journal of Memory and Language*, *58*(3), 701–729. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2007.08.003>
- Bryant, D. J., & Tversky, B. (1992). Assessing spatial frameworks with object and direction probes. *Bulletin of the Psychonomic Society*. <https://doi.org/10.3758/BF03330388>
- Bryant, D. J., & Tversky, B. (1999). Mental Representations of Perspective and Spatial Relations from Diagrams and Models, *25*(1), 137–156.
- Bryant, D. J., Tversky, B., & Franklin, N. (1992). Internal and external spatial frameworks for representing described scenes. *Journal of Memory and Language*, *31*, 74–98.
- Bub, D. N., Masson, M. E. J., & Cree, G. S. (2008). Evocation of functional and volumetric gestural knowledge by objects and words. *Cognition*, *106*(1), 27–58. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.12.010>
- Burkhardt, J. M. (2003). Réalité virtuelle et ergonomie: Quelques apports réciproques. *Travail*

- Humain*, 66(1), 65–91.
- Burkhardt, J. M., Bardy, B., & Lourdeaux, D. (2003). Immersion, réalisme et présence dans la conception et l'évaluation des environnements virtuels. *Psychologie Française*, 48, 35–42.
- Burroughs, W. J., & Sadalla, E. K. (1979). Asymmetries in distance cognition. *Geographical Analysis*, 11(4), 414–421.
- Buttenfield, B. P. (1986). Comparing distortion on sketch maps and MDS configurations. *Professional Geographer*, 38(3), 238–246.
- Byrne, R. W. (1979). Memory for Urban Geography. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 31(1), 147–154. <https://doi.org/10.1080/14640747908400714>
- Cadwallader, M. (1979). Problems in cognitive distance: Implications for cognitive mapping. *Environment and Behavior*, 11(4), 559–576.
- Campos, J. L., Butler, J. S., & Bühlhoff, H. H. (2012). Multisensory integration in the estimation of walked distances. *Experimental Brain Research*, 218(4), 551–565. <https://doi.org/10.1007/s00221-012-3048-1>
- Cañal-Bruland, R., & van der Kamp, J. (2009). Action goals influence action-specific perception. *Psychonomic Bulletin and Review*, 16(6), 1100–1105. <https://doi.org/10.3758/PBR.16.6.1100>
- Canter, D., & Tagg, S. K. (1975). Distance estimation in cities. *Environment and Behavior*, 7(1), 59–80. <https://doi.org/10.1177/001391657500700102>
- Casasanto, D. (2009). Embodiment of abstract concepts: good and bad in right- and left-handers. *Journal of Experimental Psychology. General*, 138(3), 351–367. <https://doi.org/10.1037/a0015854>
- Chambon, M. (2009). Embodied perception with others' bodies in mind: Stereotype priming influence on the perception of spatial environment. *Journal of Experimental Social Psychology*, 45(1), 283–287. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2008.08.023>
- Chance, S. S., Gaunet, F., Beall, A. C., & Loomis, J. (1998). Locomotion mode affects the updating of objects encountered during travel: the contribution of vestibular and

- proprioceptive inputs to path integration. *Presence*, 7(2), 168–178.
- Chao, L. L., & Martin, A. (2000). Representation of manipulable man-made objects in the dorsal stream. *NeuroImage*, 12(4), 478–484. <https://doi.org/10.1006/nimg.2000.0635>
- Chase, W. G. (1983). Spatial representations of taxi drivers. In *The acquisition of symbolic skills* (pp. 391–405). Boston: Springer.
- Cheeseman, J. F., Millar, C. D., Greggers, U., Lehmann, K., Pawley, M. D. M., Gallistel, C. R., ... Menzel, R. (2014). Way-finding in displaced clock-shifted bees proves bees use a cognitive map. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(24), 8949–8954. <https://doi.org/10.1073/pnas.1408039111>
- Chomsky, N. (1957). *Syntactic structures*. Berlin: Walter de Gruyter.
- Chrastil, E. R., & Warren, W. H. (2012). Active and passive contributions to spatial learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, 19(1), 1–23. <https://doi.org/10.3758/s13423-011-0182-x>
- Chrastil, E. R., & Warren, W. H. (2013). Active and passive spatial learning in human navigation: acquisition of survey knowledge. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 39(5), 1520–1537. <https://doi.org/10.1037/a0032382>
- Christou, C. G., & Bühlhoff, H. H. (1999). View dependence in scene recognition after active learning. *Memory & Cognition*, 27(6), 996–1007.
- Chwalbinska-Moneta, J., & Hanninen, O. (1989). Effect of active warming-up on thermoregulatory, circulatory, and metabolic responses to incremental exercise in endurance-trained athletes. / Effet d' un echauffement actif sur les reponses thermoregulateures, circulatoires et metaboliques a un exercice. *International Journal of Sports Medicine*, 10(1), 25–29. Retrieved from <http://proxy.lib.sfu.ca/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=sph&AN=SPH249251&site=ehost-live>
- Clark, A. (1989). *Microcognition: Philosophy, cognitive science and parallel distributed processing*. Cambridge: MIT Press.
- Clark, A., & Chalmers, D. (1998). The extended mind. *Analysis*, 58(1), 7–19.

-
- Clark, A., & Wilson, R. A. (2009). How to situate cognition. In *The Cambridge Handbook of Situated Cognition* (pp. 55–77). Cambridge: Cambridge University Press.
- Clark, H. H. (1973). Space, time, semantics, and the child. In *Cognitive development and the acquisition of language* (pp. 27–63). New York: Academic Press.
- Clayton, K., & Chattin, D. (1989). Spatial and semantic priming effects in tests of spatial knowledge. *Journal of Experimental Psychology*, *15*(3), 495–506.
- Coello, Y., & Bartolo, A. (2012). Contribution of the action system to language perception and comprehension: Evidence and controversies. In Y. Coello & A. Bartolo (Eds.), *Language and action in cognitive neuroscience* (pp. 319–346). New York: Psychology Press.
- Coello, Y., & Delevoeye-Turrell, Y. (2007). Embodiment, spatial categorisation and action. *Consciousness and Cognition*, *16*(3), 667–683. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2007.07.003>
- Cohen, R. L. (1981). On the generality of some memory laws. *Scandinavian Journal of Psychology*, *22*(1), 267–281. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9450.1981.tb00402.x>
- Cole, S., & Balcetis, E. (2013). Sources of Resources: Bioenergetic and Psychoenergetic Resources Influence Distance Perception. *Social Cognition*, *31*(6), 721–732. <https://doi.org/10.1521/soco.2013.31.6.721>
- Colley, A., Mulhern, G., Maltby, J., & Wood, A. M. (2009). The short form BSRI: Instrumentality, expressiveness and gender associations among a United Kingdom sample. *Personality and Individual Differences*, *46*(3), 384–387.
- Collins, A. M., & Loftus, E. F. (1975). A spreading-activation theory of semantic processing. *Psychological Review*, *82*(6), 407–428. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(92\)90041-F](https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90041-F)
- Collins, A. M., & Quillian, R. M. (1969). Retrieval time from semantic memory, *8*, 240–247.
- Comte, A. (1852). *Cours de philosophie positive* (2ème ed.). Paris: Borrani & Droz (Ouvrage original publié en 1830).
- Conway, M. A. (1991). In defense of everyday memory. *American Psychologist*, *46*(1), 19–26.

- Cook, D., & Weisberg, S. (1982). Residuals and Influence in Regression. In D. R. Cox & D. V. Hinkley (Eds.), *Monographs on Statistics and Applied Probability* (pp. 1–230). New York: Chapman and Hall.
- Corsi, P. (1972). *Memory and the medial temporal region of the brain. Unpublished doctoral dissertation.* McGill University, Montréal, QB.
- Costantini, M., Ambrosini, E., Scorolli, C., & Borghi, A. M. (2011). When objects are close to me: Affordances in the peripersonal space. *Psychonomic Bulletin and Review*, *18*(2), 302–308. <https://doi.org/10.3758/s13423-011-0054-4>
- Coventry, K. R. (2012). On the mapping between spatial language and the vision and action systems. In Y. Coello & A. Bartolo (Eds.), *Language and Action in Cognitive Neuroscience* (pp. 209–223). New York: Psychology Press. <https://doi.org/10.4324/9780203095508>
- Craik, F. I. M., & Lockhart, R. S. (1972). Levels of processing: a framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *11*, 671–684.
- Crawford, L. E., Margolies, S. M., Drake, J. T., & Murphy, M. E. (2006). Affect biases memory of location: Evidence for the spatial representation of affect. *Cognition and Emotion*, *20*(8), 1153–1169. <https://doi.org/10.1080/02699930500347794>
- Creem-Regehr, S. H., Gooch, A. A., Sahn, C. S., & Thompson, W. B. (2004). Perceiving virtual geographical slant: Action influences perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *30*(5), 811–821. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.30.5.811>
- Creem, S. H., & Proffitt, D. R. (1998). Two memories for geographical slant: Separation and interdependence of action and awareness. *Psychonomic Bulletin and Review*, *5*(1), 22–36. <https://doi.org/10.3758/BF03209455>
- Dakopoulos, D., & Bourbakis, N. G. (2010). Wearable obstacle avoidance electronic travel aids for blind: A survey. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, *40*(1), 25–35. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2009.2021255>
- Damasio, A. R., & Damasio, H. (1994). Cortical systems for retrieval of concrete knowledge: The convergence zone framework. In C. Koch & J. L. Davis (Eds.), *Large-scale*

neuronal theories of the brain. Cambridge: MIT Press.

- Davidson, R. J. (1992). Anterior cerebral asymmetry and the nature of emotion. *Brain and Cognition*, *20*, 125–151.
- Davidson, R. J., Ekman, P., Saron, C. D., Senulis, J. A., & Friesen, W. V. (1990). Approach-withdrawal and cerebral asymmetry: emotional expression and brain physiology I. *Journal of Personality and Social Psychology*, *58*(2), 330–341.
- De Beni, R., Pazzaglia, F., Gyselinck, V., & Meneghetti, C. (2005). Visuospatial working memory and mental representation of spatial descriptions. *European Journal of Cognitive Psychology*, *17*(1), 77–95. <https://doi.org/10.1080/09541440340000529>
- Decety, J. (1993). Analysis of actual and mental movement times in graphic tasks. *Acta Psychologica*, *82*, 367–372. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(93\)90021-I](https://doi.org/10.1016/0001-6918(93)90021-I)
- Decety, J., & Grèzes, J. (2006). The power of simulation: Imagining one's own and other's behavior. *Brain Research*, *1079*(1), 4–14. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2005.12.115>
- Decety, J., Jeannerod, M., & Prablanc, C. (1989). The timing of mentally represented actions. *Behavioural Brain Research*, *34*(1989), 35–42.
- Decety, J., & Michel, F. (1989). Analysis of actual and mental movement times in graphic tasks. *Brain and Cognition*, *11*, 87–97. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(93\)90021-I](https://doi.org/10.1016/0001-6918(93)90021-I)
- Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The Mental Representation of Parity and Number Magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, *122*(3), 371–396. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.122.3.371>
- Denis, M. (2017). Arrows in diagrammatic and navigational spaces. In J. Zacks & H. A. Taylor (Eds.), *Representations in Mind and World. Essays inspired by Barbara Tversky* (pp. 63–84). New York: Routledge.
- Denis, M. (2018). *Space and spatial cognition: a multidisciplinary perspective*. New York: Routledge.
- Denis, M., & Denhière, G. (1990). Comprehension and recall of spatial descriptions. *Cahiers de Psychologie Cognitive/Current Psychology of Cognition*, *10*(2), 115–143.
- Denis, M., & Dubois, D. (1976). La représentation cognitive : quelques modèles récents.

L'année Psychologique, 76(2), 541–562.

- 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(2), 145–174. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0720\(199904\)13:2<145::AID-ACP550>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0720(199904)13:2<145::AID-ACP550>3.0.CO;2-4)
- Dennison, M. S., Wisti, A. Z., & D’Zmura, M. (2016). Use of physiological signals to predict cybersickness. *Displays*, 44, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2016.07.002>
- Dewey, J. (1896). The Reflex Arc Concept in Psychology. *The Psychological Review*, 3(4), 357–370. <https://doi.org/10.1126/science.3.71.712-a>
- Dijkstra, K., Kaschak, M. P., & Zwaan, R. A. (2007). Body posture facilitates retrieval of autobiographical memories. *Cognition*, 102(1), 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2005.12.009>
- Dinoff, A., Herrmann, N., Swardfager, W., & Lanctôt, K. L. (2017). The effect of acute exercise on blood concentrations of brain-derived neurotrophic factor in healthy adults: a meta-analysis. *European Journal of Neuroscience*, 46(1), 1635–1646. <https://doi.org/10.1111/ejn.13603>
- Downs, R. M., & Stea, D. (1973). Cognitive maps and spatial behaviour: process and products. In R. M. Downs & D. Stea (Eds.), *Image and environment: Cognitive mapping and spatial behavior* (pp. 8–26). Chicago: Aldine Press.
- Durgin, F. H., Baird, J. A., Greenburg, M., Russell, R., Shaughnessy, K., & Waymouth, S. (2009). Who is being deceived? The experimental demands of wearing a backpack. *Psychonomic Bulletin and Review*, 16(5), 964–969. <https://doi.org/10.3758/PBR.16.5.964>
- Dutriaux, L. (2016). *Vers des modèles spatiaux incarnés : Mémoire , posture et possibilités d’action*. Université Paris Descartes.
- Dutriaux, L., Dahiez, X., & Gyselinck, V. (2018). How to change your memory of an object with a posture and a verb. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 72(5), 1112–1118. <https://doi.org/10.1177/1747021818785096>
- Dutriaux, L., & Gyselinck, V. (2016a). Cognition incarnée : un point de vue sur les

- représentations spatiales. *L'Année Psychologique*, 116(03), 419–465.
<https://doi.org/10.4074/s0003503316000373>
- Dutriaux, L., & Gyselinck, V. (2016b). Learning is better with the hands free: The role of posture in the memory of manipulable objects. *PLoS ONE*, 11(7), 1–11.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159108>
- Ehrlich, M.-F., Tardieu, H., & Cavazza, M. (1993). *Les modèles mentaux: approche cognitive de représentations*. Paris: Masson.
- Einstein, A. (1920). *Relativity: the special and general theory*. New York: Henry Holt and Company.
- Ellis, R., & Tucker, M. (2000). Micro-affordance: The potentiation of components of action by seen objects. *British Journal of Psychology*, 91(4), 451–471.
<https://doi.org/10.1348/000712600161934>
- Emmorey, K., Tversky, B., & Taylor, H. a. (2001). Using space to describe space: Perspective in speech, sign, and gesture. *Spatial Cognition and Computation*, 2(1), 157–180.
<https://doi.org/10.1023/A:1013118114571>
- Eustache, F., & Desgranges, B. (2015). *Les chemins de la mémoire*. Paris: Le Pommier.
- Evans, G. W., & Pezdek, K. (1980). Cognitive mapping: Knowledge of real-world distance and location information. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 6(1), 13–24. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.6.1.13>
- Evans, L. (1970). Speed Estimation from a Moving Automobile. *Ergonomics*, 13(2), 219–230. <https://doi.org/10.1080/00140137008931135>
- Eves, F. F., Thorpe, S. K. S., Lewis, A., & Taylor-Covill, G. A. H. (2014). Does perceived steepness deter stair climbing when an alternative is available? *Psychonomic Bulletin and Review*, 21(3), 637–644. <https://doi.org/10.3758/s13423-013-0535-8>
- Fadiga, L., Fogassi, L., Pavesi, G., & Rizzolatti, G. (1995). Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study. *Journal of Neurophysiology*, 73(6), 2608–2611. <https://doi.org/10.1152/jn.1995.73.6.2608>
- Fajen, B. R. (2005). Perceiving possibilities for action: On the necessity of calibration and

- perceptual learning for the visual guidance of action. *Perception*, 34(6), 717–740. <https://doi.org/10.1068/p5405>
- Farnè, A., Demattè, M. L., Làdavas, E., & Dematte, M. L. (2005). Neuropsychological evidence of modular organization of the near peripersonal space. *Neurology*, 65, 1754–1758. <https://doi.org/10.1212/01.wnl.0000187121.30480.09>
- Farrell, M. J., Arnold, P., Pettifer, S., Adams, J., Graham, T., & MacManamon, M. (2003). Transfer of route learning from virtual to real environments. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 9, 219–227.
- Firestone, C., & Scholl, B. J. (2014). “Top-Down” Effects Where None Should Be Found: The El Greco Fallacy in Perception Research. *Psychological Science*, 25(1), 38–46. <https://doi.org/10.1177/0956797613485092>
- Firestone, C., & Scholl, B. J. (2016). Cognition does not affect perception: Evaluating the evidence for top-down effects. *Behavioral and Brain Sciences*, 39, 1–77. <https://doi.org/10.1017/S0140525X15000965>
- Flumini, A., Barca, L., Borghi, A. M., & Pezzulo, G. (2015). How do you hold your mouse? Tracking the compatibility effect between hand posture and stimulus size. *Psychological Research*, 79(6), 928–938. <https://doi.org/10.1007/s00426-014-0622-0>
- Fodor, J. (1983). *The modularity of mind*. Cambridge: The MIT Press.
- Foo, P., Warren, W. H., Duchon, A., & Tarr, M. J. (2005). Do humans integrate routes into a cognitive map? Map- versus landmark-based navigation of novel shortcuts. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 31(2), 195–215. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.31.2.195>
- Francis, B. A., & Wonham, W. M. (1976). The internal model principle of control theory. *Automatica*, 12(5), 457–465.
- Franklin, N., & Tversky, B. (1990). Searching Imagined Environments. *Journal of Experimental Psychology: General*, 119(1), 63–76. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.119.1.63>
- Friedman, A., & Kohler, B. (2003). Bidimensional Regression: Assessing the Configural Similarity and Accuracy of Cognitive Maps and Other Two-Dimensional Data Sets.

- Psychological Methods*, 8(4), 468–491. <https://doi.org/10.1037/1082-989X.8.4.468>
- Friston, K. (2005). A theory of cortical responses. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1456), 815–836. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1622>
- Friston, K. (2012). Embodied inference and spatial cognition. *Cognitive Processing*, 13(S1), 171–177. <https://doi.org/10.1007/s10339-012-0519-z>
- Fuchs, P., & Moreau, G. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle. Volume 2: l'interfaçage, l'immersion, et l'interaction en environnement virtuel*. Paris: Presse des Mines.
- Gagnon, S. A., Brunyé, T. T., Gardony, A. L., Noordzij, M. L., Mahoney, C. R., & Taylor, H. A. (2014). Stepping into a map: Initial heading direction influences spatial memory flexibility. *Cognitive Science*, 38(2), 275–302. <https://doi.org/10.1111/cogs.12055>
- Galati, G., Lobel, E., Vallar, G., Berthoz, A., Pizzamiglio, L., & Bihan, D. Le. (2000). The neural basis of egocentric and allocentric coding of space in humans: A functional magnetic resonance study. *Experimental Brain Research*, 133(2), 156–164. <https://doi.org/10.1007/s002210000375>
- Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L., & Rizzolatti, G. (1996). Action recognition in the premotor cortex. *Brain*, 119(2), 593–609. <https://doi.org/10.1093/brain/119.2.593>
- Gallistel, C. R. (1990). *The organization of learning*. Cambridge: The MIT Press.
- Gardony, A. L., Brunyé, T. T., Mahoney, C. R., & Taylor, H. A. (2013). How Navigational Aids Impair Spatial Memory: Evidence for Divided Attention. *Spatial Cognition & Computation*, 13(4). <https://doi.org/10.1080/13875868.2013.792821>
- Gardony, A. L., Taylor, H. A., & Brunyé, T. T. (2016). Gardony Map Drawing Analyzer: Software for quantitative analysis of sketch maps. *Behavior Research Methods*, 48(1), 151–177. <https://doi.org/10.3758/s13428-014-0556-x>
- Gärbling, T., & Golledge, R. G. (1989). Environmental perception and cognition. In E. H. Zube & G. T. Moore (Eds.), *Advances in Environment, Behavior and Design* (pp. 203–236). Boston: Springer.
- Gaunet, F., Vidal, M., Kemeny, A., & Berthoz, A. (2001). Active, passive and snapshot

- exploration in a virtual environment: Influence on scene memory, reorientation and path memory. *Cognitive Brain Research*, 11(3), 409–420. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(01\)00013-1](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(01)00013-1)
- Gibbs, R. W. (2006). *Embodiment and cognitive science*. New York: Cambridge University Press.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Glenberg, A. M. (1997). What is memory for? *Behavioral and Brain Sciences*, 20, 1–55. <https://doi.org/10.1017/S0140525X97460016>
- Glenberg, A. M., & Kaschak, M. P. (2002). Grounding Language in Action. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(3), 558–565. <https://doi.org/10.1109/TAMD.2011.2140890>
- Glenberg, A. M., Meyer, M., & Lindem, K. (1987). Mental models contribute to foregrounding during text comprehension. *Journal of Memory and Language*, 26(1), 69–83. [https://doi.org/10.1016/0749-596X\(87\)90063-5](https://doi.org/10.1016/0749-596X(87)90063-5)
- Gobert, J. D. (1999). Expertise in the comprehension of architectural plans. In J. Gero & B. Tversky (Eds.), *Visual and spatial reasoning in design* (pp. 185–205). Sidney: Key Centre of Design Computing and Cognition.
- Godden, D. R., & Baddeley, A. (1975). Context-dependant memory in two natural environments: on land and underwater. *British Journal of Psychology*, 66(3), 325–331.
- Goldin-Meadow, S., & Beilock, S. (2010). Action's influence on thought: The case of gesture NIH Public Access Author Manuscript. *Perspectives on Psychological Science*, 5(6), 664–674. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3093190/pdf/nihms191299.pdf>
- Golding, J. F. (2006). Predicting individual differences in motion sickness susceptibility by questionnaire. *Personality and Individual Differences*, 41(2), 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2006.01.012>
- Goldman, A. I. (1989). Interpretation psychologized. *Mind and Language*, 4, 161–185.
- Goldman, A. I. (2012). Theory of Mind. In E. Margolis, R. Samuels, & S. Stich (Eds.), *Oxford Handbook of Philosophy and Cognitive Science* (pp. 1–25). New York: Oxford

- University Press. Retrieved from https://fas-philosophy.rutgers.edu/goldman/Theory of Mind _Oxford Handbook_.pdf
- Goldstone, R. L. (1995). Effects of categorization on color perception. *Psychological Science*, 6(5), 298–304.
- Golledge, R. G. (1976). Methods and methodological issues in environmental cognition research. In G. T. Moore & R. G. Golledge (Eds.), *Environmental knowing: Theories, research, and methods* (pp. 300–313). Stroudsburg: Dowden, Hutchinson & Ross.
- Golledge, R. G. (1995). Path Selection and Route Preference in Human Navigation: a Progress Report. In *International Conference on Spatial Information Theory* (pp. 207–222). Berlin: Springer.
- Goodrich, B., Gabry, J., Ali, I., & Brilleman, S. (2018). rstanarm: Bayesian applied regression modeling via Stan. R package version 2.17.4.
- Gordon, R. M. (1986). Folk psychology as simulation. *Mind & Language*, 1(2), 158–171.
- Grant, S. C., & Magee, L. E. (1998). Contributions of Proprioception to Navigation in Virtual Environments. *Human Factors*, 40(3), 489–497. <https://doi.org/10.1518/001872098779591296>
- Gregory, R. L. (1980). Perceptions as hypotheses. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 290(1038), 181–197. <https://doi.org/10.1098/rstb.1980.0090>
- Grison, E. (2015). *Planifier et choisir un itinéraire en milieu urbain : approches plurielles d'un problème cognitif*. Université Paris Descartes.
- Grison, E., & Gyselinck, V. (2019). La cognition spatiale pour repenser les aides à la navigation. *L'Année Psychologique*, 119(2), 243–278.
- Grison, E., Gyselinck, V., & Burkhardt, J. M. (2016). Exploring factors related to users' experience of public transport route choice: influence of context and users profiles. *Cognition, Technology and Work*, 18(2), 287–301. <https://doi.org/10.1007/s10111-015-0359-6>
- Grünbaum, A. (1964). *Philosophical problems of space and time*. New York: Routledge and

Kegan Paul.

Gulliver, F. P. (1908). Orientation of maps. *Journal of Geography*, 7(3), 55–58. <https://doi.org/10.1080/00221340808985373>

Gyselinck, V. (2013). Spalife. Les représentations spatiales tout au long de la vie: facteurs cognitifs et développementaux. In *Compte-rendu final Projet-ANR09-BLAN- 0344-01, 2009-2012*.

Gyselinck, V., De Beni, R., Pazzaglia, F., Meneghetti, C., & Mondoloni, A. (2007). Working memory components and imagery instructions in the elaboration of a spatial mental model. *Psychological Research*, 71(3), 373–382. <https://doi.org/10.1007/s00426-006-0091-1>

Gyselinck, V., Meneghetti, C., De Beni, R., & Pazzaglia, F. (2009). The role of working memory in spatial text processing: What benefit of imagery strategy and visuospatial abilities? *Learning and Individual Differences*, 19(1), 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2008.08.002>

Gyselinck, V., Picucci, L., Nicolas, S., & Piolino, P. (2006). Construction of a spatial mental model from a verbal description or from navigation in a virtual environment. *Cognitive Processing*, 7(1), 46–48. <https://doi.org/10.1007/s10339-006-0059-5>

Hafting, T., Fyhn, M., Molden, S., Moser, M.-B., & Moser, E. I. (2005). Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex. *Nature*, 436(7052), 801–806. <https://doi.org/10.1038/nature03721>

Haggard, P., & Jundi, S. (2009). Rubber hand illusions and size-weight illusions: Self-representation modulates representation of external objects. *Perception*, 38(12), 1796–1803. <https://doi.org/10.1068/p6399>

Hardwick, D. A., McIntyre, C. W., & Pick, H. L. (1976). The content and manipulation of cognitive maps in children and adults. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 41(3), 1–55.

Harnad, S. (1990). The symbol grounding problem. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 42, 335–346.

Hart, R. A., & Moore, G. T. (1973). The development of spatial cognition: A review. In R. M.

-
- Downs & D. Stea (Eds.), *Image & environment: Cognitive mapping and spatial behavior* (pp. 246–288). Chicago: Aldine Press.
- Hartley, A. A. (1977). Mental measurement in the magnitude estimation of length. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 1, 3(4), 622–628.
- Hartley, T., Lever, C., Burgess, N., & O’Keefe, J. (2013). Space in the brain: how the hippocampal formation supports spatial cognition. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1635), 20120510–20120510. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0510>
- Haugeland, J. (1989). *L’esprit dans la machine*. Paris: Odile Jacob.
- Hazen, N. L. (1982). Spatial Exploration and Spatial Knowledge: Individual and Developmental Differences in Very Young Children. *Child Development*, 53(3), 826–833.
- Heal, J. (1986). Replication and functionalism. In J. Butterfield (Ed.), *Language, Mind, and Logic* (pp. 135–150). Cambridge: Cambridge University Press.
- Hebb, D. O. (1938). Studies of the organization of behavior. I. Behavior of the rat in a field orientation. *Journal of Comparative Psychology*, 25(2), 333–353.
- Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior*. New York: Wiley.
- Hegarty, M., Montello, D. R., Richardson, A. E., Ishikawa, T., & Lovelace, K. (2006). Spatial abilities at different scales: Individual differences in aptitude-test performance and spatial-layout learning. *Intelligence*, 34(2), 151–176. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2005.09.005>
- Hegarty, M., Richardson, A. E., Montello, D. R., Lovelace, K., & Subbiah, I. (2002). Development of a self-report measure of environmental spatial ability. *Intelligence*, 30, 425–447. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.022>
- Hintzman, D. L. (1986). “Schema abstraction” in a multiple-trace memory model. *Psychological Review*, 93(4), 411–428.
- Hirtle, S. C., & Mascolo, M. F. (1992). The heuristics of spatial cognition. In *Proceedings of the 13th annual conference of the cognitive science society* (pp. 629–634). Hillsdale:

- Erlbaum Lawrence.
- Hirtle, S. C., & Mascolo, M. F. (1986). Effect of Semantic Clustering on the Memory of Spatial Locations. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, 12(2), 182–189.
- Hirtle, Stephen C., & Jonides, J. (1985). Evidence of hierarchies in cognitive maps. *Memory & Cognition*, 13(3), 208–217. <https://doi.org/10.3758/BF03197683>
- Hoffman, R. R., & Nead, J. M. (1983). General contextualism, ecological science and cognitive research. *The Journal of Mind and Behavior*, 4(4), 507–560.
- Hollan, J. D. (1975). Features and semantic memory: Set-theoretic or network model? *Psychological Review*, (82), 154–155.
- Hommel, B. (2017). Goal-Directed Actions. In R. Waldmann (Ed.), *The Oxford Handbook of Causal Reasoning* (pp. 265–288). Oxford: Oxford University Press.
- Hostetter, A. B., & Alibali, M. W. (2008). Visible embodiment: Gestures as simulated action. *Psychonomic Bulletin and Review*, 15(3), 495–514. <https://doi.org/10.3758/PBR.15.3.495>
- Huang, J. Y., Tsai, C. H., & Huang, S. T. (2012). The next generation of GPS navigation systems. *Communication of the ACM*, 55(3), 84–93.
- Hughes, B., Epstein, W., Schneider, S., & Dudock, A. (1990). An asymmetry in transmodal perceptual learning. *Perception & Psychophysics*, 48(2), 143–150. <https://doi.org/10.3758/BF03207081>
- Hull, C. L. (1952). *A behavior system; an introduction to behavior theory concerning the individual organism*. New Haven: Yale University Press.
- Hunt, R. R., & Worthen, J. B. (2006). *Distinctiveness and memory*. New York: Oxford University Press.
- Hutorowicz, H. (1911). Maps of primitive peoples. *Bulletin of the American Geographical Society of New York*, 43(1), 669.
- Iachini, T., & Giusberti, F. (2004). Metric properties of spatial images generated from locomotion: The effect of absolute size on mental scanning. *European Journal of*

-
- Cognitive Psychology*, 16(4), 573–596. <https://doi.org/10.1080/09541440340000321>
- Iglói, K., Zaoui, M., Berthoz, A., & Rondi-Reig, L. (2009). Sequential egocentric strategy is acquired as early as allocentric strategy: Parallel acquisition of these two navigation strategies. *Hippocampus*, 19(12), 1199–1211. <https://doi.org/10.1002/hipo.20595>
- Jamalian, A., Giardino, V., & Tversky, B. (2013). Gestures for Thinking. *Proceedings of the 35th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, 35, 645–650.
- James, W. (1890). *The principles of psychology, Volume 2*. New York: Holt.
- Jeannerod, M. (1999). The 25th Bartlett Lecture: To act or not to act: Perspectives on the representation of actions. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 52(1), 1–29.
- Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action: A unifying mechanism for motor cognition. *NeuroImage*, 14, 103–109. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0832>
- Jeannerod, M. (2003). The mechanism of self-recognition in humans. *Behavioural Brain Research*, 142, 1–15.
- Johnson-Laird, P. N. (1980). Mental Models in Cognitive Science. *Cognitive Science*, 115, 71–115.
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness*. Cambridge: Harvard University Press.
- Jordan, M. I. (1995). The organization of action sequences: Evidence from a relearning task. *Journal of Motor Behaviour*, 27, 179–192.
- Kang, S., & Tversky, B. (2016). From hands to minds: Gestures promote understanding. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 1(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s41235-016-0004-9>
- Kant, E. (1781). Critique de la raison pure par Emmanuel Kant. Traduction française par J. Auxenfans. Retrieved July 10, 2019, from http://classiques.uqac.ca/classiques/kant_emmanuel/Critique_de_la_raison_pure/Critique_de_la_raison_pure_IMAGE.pdf
- Kaplan, S. (1973). Cognitive maps in perception and thought. In R. M. Downs & D. Stea

-
- (Eds.), *Image and environment: Cognitive mapping and spatial behavior* (pp. 63–78). Chicago: Aldine Press.
- Kellner, F., Bolte, B., Bruder, G., Rautenberg, U., Steinicke, F., Lappe, M., & Koch, R. (2012). Geometric calibration of head-mounted displays and its effects on distance estimation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *18*(4), 589–596. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2012.45>
- Kerst, S. M., & Howard, J. H. (1978). Memory psychophysics for visual area and length. *Memory & Cognition*, *6*(3), 327–335. <https://doi.org/10.3758/BF03197463>
- Keshavarz, B., & Hecht, H. (2011). Validating an efficient method to quantify motion sickness. *Human Factors*, *53*(4), 415–426. <https://doi.org/10.1177/0018720811403736>
- Kesner, R. P., & Creem-Regehr, S. H. (2013). Parietal contributions to spatial cognition. In D. Waller & L. Nadel (Eds.), *Handbook of spatial cognition* (pp. 35–63). Washington: American Psychological Association.
- Kirsch, W., & Kunde, W. (2018). The Paddle Effect in the Pong Task Is Not Due to Blocking Ability of the Observer. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *44*(11), 1799–1804.
- Kitchin, R. M. (1994). Cognitive maps: what are they and why study them? *Journal of Environmental Psychology*, *14*, 1–19.
- Klatzky, R. L. (1998). Allocentric and Egocentric Spatial Representations: Definitions, Distinctions, and Interconnections. In C. Freska, C. Habel, & K. F. Wender (Eds.), *Spatial Cognition* (pp. 1–17). Berlin: Springer.
- 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. <https://doi.org/10.1080/00222895.1990.10735500>
- Klatzky, R. L., Marston, J. R., Giudice, N. A., Golledge, R. G., & Loomis, J. (2006). Cognitive load of navigating without vision when guided by virtual sound versus spatial language. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *12*(4), 223–232. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.12.4.223>
- Kluss, T., Marsh, W. E., Zetsche, C., & Schill, K. (2015). Representation of impossible

- worlds in the cognitive map. *Cognitive Processing*, 16(1), 271–276. <https://doi.org/10.1007/s10339-015-0705-x>
- Knapp, J. M., & Loomis, J. (2004). Limited field of view of head-mounted displays is not the cause of distance underestimation in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 13(5), 572–577. <https://doi.org/10.1162/1054746042545238>
- König, S. U., Goeke, C., Meilinger, T., & König, P. (2019). Are allocentric spatial reference frames compatible with theories of Enactivism? *Psychological Research*, 83(3), 498–513. <https://doi.org/10.1007/s00426-017-0899-x>
- Kosslyn, S. M. (1987). Seeing and Imagining in the Cerebral Hemispheres: A Computational Approach. *Psychological Review*, 94(2), 148–175. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.94.2.148>
- Kosslyn, S. M., Ball, T. M., & Reiser, B. J. (1978). Visual images preserve metric spatial information: evidence from studies of image scanning. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 4(1), 47–60. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.4.1.47>
- Kosslyn, S. M., & Koenig, O. (1992). *Wet Mind: The New Cognitive Neuroscience*. New York: The Free Press.
- Kosslyn, S. M., Pick, & Fariello, G. R. (1974). Cognitive Maps in Children and Men. *Child Development*, 45(3), 707–716.
- Kosslyn, S. M., Thompson, W. L., & Ganis, G. (2006). *The case for mental imagery*. New York: Oxford University Press.
- Krebs, J. R., & Davies, N. B. (1993). *An introduction to behavioural ecology (3rd ed.)*. Malden: Blackwell.
- Kriegeskorte, N., & Douglas, P. K. (2018). Cognitive computational neuroscience. *Nature Neuroscience*, 21(9), 1148–1160. <https://doi.org/10.1038/s41593-018-0210-5>
- Kristensen, M., & Hansen, T. (2004). Statistical analyses of repeated measures in physiological research: A tutorial. *American Journal of Physiology - Advances in Physiology Education*, 28, 2–14. <https://doi.org/10.1152/advan.00042.2003>

-
- Kruschke, J. K. (2010). What to believe: Bayesian methods for data analysis. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(7), 293–300. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.05.001>
- Kuhn, T. S. (1972). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris: Flammarion.
- Kuipers, B. (1977). *Representing Knowledge of Large-Scale Space*. *Electrical Engineering*.
- Kuipers, B. (1978). Modeling spatial knowledge. *Cognitive Science*, 2(2), 129–153. [https://doi.org/10.1016/S0364-0213\(78\)80003-2](https://doi.org/10.1016/S0364-0213(78)80003-2)
- Kuipers, B. (1983). The cognitive map: could it have been any other way? In L. Pick & L. J. Acredolo (Eds.), *Spatial Orientation: Theory, Research and Application* (pp. 345–359). New York: Plenum Press.
- Kuipers, B. (2000). The Spatial Semantic Hierarchy. *Artificial Intelligence*, 119(1–2), 191–233. [https://doi.org/Doi 10.1016/S0004-3702\(00\)00017-5](https://doi.org/Doi 10.1016/S0004-3702(00)00017-5)
- Kunz, B. R., Creem-Regehr, S. H., & Thompson, W. B. (2009). Evidence for Motor Simulation in Imagined Locomotion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35(5), 1458–1471. <https://doi.org/10.1037/a0015786>
- Kunz, B. R., Wouters, L., Smith, D., Thompson, W. B., & Creem-Regehr, S. H. (2009). Revisiting the effect of quality of graphics on distance judgments in virtual environments: A comparison of verbal reports and blind walking. *Attention, Perception & Psychophysics*, 71(6), 1284–1293. <https://doi.org/10.3758/APP>
- Lagacé, S., Downing-Doucet, F., & Guérard, K. (2012). Norms for grip agreement for 296 photographs of objects. *Behavior Research Methods*, 45(3), 772–781. <https://doi.org/10.3758/s13428-012-0283-0>
- Laitin, E. L., Tymoski, M. J., Tenhundfeld, N. L., & Witt, J. K. (2019). The uphill battle for action-specific perception. *Attention, Perception, and Psychophysics*. <https://doi.org/10.3758/s13414-018-01652-w>
- Lakoff, G. (1987). *Women, fire, and dangerous things: What categories reveal about the mind*. Chicago: Chicago University Press.
- Lakoff, G., & Johnson, M. (1980). *Metaphors we live by*. Chicago: University of Chicago Press.

- Lashley, K. S. (1950). *In search of the engram* (4ème ed.). New York: Academic Press.
- Lawton, C. A. (1994). Gender differences in way-finding strategies: Relationship to spatial ability and spatial anxiety. *Sex Roles*, 30(11–12), 765–779. <https://doi.org/10.1007/BF01544230>
- Le Ny, J. F. (1989). *Science cognitive et compréhension du langage*. Paris: PUF.
- Lecadet, C., & Mehanna, M. (2006). *Histoire de la psychologie*. Paris: Belin.
- Lee, P. U., & Tversky, B. (2005). Interplay Between Visual and Spatial: The Effect of Landmark Descriptions on Comprehension of Route / Survey Spatial Descriptions. *Spatial Cognition & Computation*, 5(2–3), 163–185. <https://doi.org/10.1207/s15427633scc052>
- Legge, E. L. G., Madan, C. R., Ng, E. T., & Caplan, J. B. (2012). Building a memory palace in minutes: Equivalent memory performance using virtual versus conventional environments with the Method of Loci. *Acta Psychologica*, 141(3), 380–390. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2012.09.002>
- Legrand, M. (1990). Du behaviorisme au cognitivisme. *L'année Psychologique*, 90(2), 247–286. <https://doi.org/10.3406/psy.1990.29399>
- Leibniz, G. W. (1994). *New essays on human understanding*. English traduction by P. Remnant and J. Bennett. Cambridge: Cambridge University Press.
- Leshed, G., Velden, T., Rieger, O., Kot, B., & Sengers, P. (2008). In-car GPS navigation: Engagement with and disengagement from the environment. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, 1675–1684. <https://doi.org/10.1145/1357054.1357316>
- Lessard, D. A., Linkenauger, S. A., & Proffitt, D. R. (2009). Look before you leap: Jumping ability affects distance perception. *Perception*, 38(12), 1863–1866. <https://doi.org/10.1068/p6509>
- Levine, M., Jankovic, I. N., & Palij, M. (1982). Principles of spatial problem solving. *Journal of Experimental Psychology: General*, 111(2), 157–175. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.111.2.157>

- Leyrer, M., Linkenauger, S. A., Bühlhoff, H. H., Kloos, U., & Mohler, B. (2011). The influence of eye height and avatars on egocentric distance estimates in immersive virtual environments. *Proceedings - APGV 2011: ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*, (July 2014), 67–74. <https://doi.org/10.1145/2077451.2077464>
- Lhuillier, S., Gyselinck, V., Dutriaux, L., Grison, E., & Nicolas, S. (2018). “Like a ball and chain”: Altering locomotion effort perception distorts spatial representations. *Journal of Environmental Psychology*, 60(August), 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2018.10.008>
- Lieblich, I., & Arbib, M. A. (1982). Multiple representations of space underlying behavior. *Behavioral and Brain Sciences*, 5(4), 627–640.
- Linkenauger, S. A., Bakdash, J. Z., & Proffitt, D. R. (2008). Putting to a bigger hole: Golf performance relates to perceived size. *Psychonomic Bulletin & Review*, 15(3), 581–585. <https://doi.org/10.3758/15.3.581>
- Linkenauger, S. A., Ramenzoni, V., & Proffitt, D. R. (2010). Illusory shrinkage and growth: Body-based rescaling affects the perception of size. *Psychological Science*, 21(9), 1318–1325. <https://doi.org/10.1177/0956797610380700>
- Linkenauger, S. A., Witt, J. K., Stefanucci, J. K., Bakdash, J. Z., & Proffitt, D. R. (2009). The Effects of Handedness and Reachability on Perceived Distance, 35(6), 1649–1660. <https://doi.org/10.1037/a0016875>
- Longo, M. R., & Lourenco, S. F. (2007). Space perception and body morphology: Extent of near space scales with arm length. *Experimental Brain Research*, 177(2), 285–290. <https://doi.org/10.1007/s00221-007-0855-x>
- Loomis, J., Blascovich, J., & Beall, A. (1999). Immersive virtual environment technology as a basic tool in psychology. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, 31(4), 557–564. Retrieved from https://link.springer.com/content/pdf/10.3758%2FBF03200735.pdf%0Ahttp://scholar.google.com/scholar?q=related:L55i1HAI9KJ:scholar.google.com/&hl=en&num=30&as_sdt=0,5%5Cnpapers2://publication/doi/10.1207/S15327965PLI1302_01
- Loomis, J., 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. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.18.4.906>
- Loomis, J., Klatzky, R. L., Golledge, R. G., Cicinelli, J. G., Pellegrino, J. W., & Fry, P. A. (1993). Nonvisual navigation by blind and sighted: Assessment of path integration ability. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122(1), 73–91. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.122.1.73>
- Loomis, J., & Knapp, J. M. (2003). Visual perception of egocentric distance in real and virtual environments. In L. J. Hettinger & M. Haas (Eds.), *Virtual and adaptive environments: Applications, implications, and human performance issues* (pp. 21–46). London: Lawrence Erlbaum Associates.
- Loomis, J., Lipka, Y., Klatzky, R. L., & Golledge, R. G. (2002). Spatial Updating of Locations Specified by 3-D Sound and Spatial Language. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, 28(2), 335–345. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.28.2.335>
- Lourenco, S. F., & Longo, M. R. (2009). The plasticity of near space: evidence for contraction, *112*(3), 451–456.
- Lynch, K. (1960). *The image of the city*. Cambridge: Harvard University Press.
- MacGregor, J. N., Chronicle, E. P., & Ormerod, T. C. (2006). A Comparison of Heuristic and Human Performance on Open Versions of the Traveling Salesperson Problem. *The Journal of Problem Solving*, 1(1), 33–43. <https://doi.org/10.7771/1932-6246.1005>
- MacGregor, J. N., & Chu, Y. (2011). Human Performance on the Traveling Salesman and Related Problems: A Review. *The Journal of Problem Solving*, 3(2), 1–29. <https://doi.org/10.7771/1932-6246.1090>
- Macintyre, T. (1996). Imagery Validation: How do we know athletes are imaging during mental practice? *Journal of Applied Sport Psychology*, 18(1), 87–121.
- Madan, C. R., & Singhal, A. (2012). Using actions to enhance memory: Effects of enactment, gestures, and exercise on human memory. *Frontiers in Psychology*, 3(NOV), 2010–2013. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00507>
- Maddock, R. J., Casazza, G. A., Fernandez, D. H., & Maddock, M. I. (2016). Acute

- Modulation of Cortical Glutamate and GABA Content by Physical Activity. *The Journal of Neuroscience*, 36(8), 2449–2457. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.3455-15.2016>
- Maddox, K. B., Rapp, D. N., Brion, S., & Taylor, H. a. (2008). Social influences on spatial memory. *Memory & Cognition*, 36(3), 479–494. <https://doi.org/10.3758/MC.36.3.479>
- Makowski, D. (2018). Indices of effect existence in the Bayesian framework. *PsyArXiv*, 1–26.
- Makowski, D., Ben-Shachar, M., & Lüdecke, D. (2019). bayestestR: describing effects and their uncertainty, existence and significance within the bayesian framework. *Journal of Open Source Software*, 4(40), 1541. <https://doi.org/10.21105/joss.01541>
- Makowski, D., & Dutriaux, L. (2017). Neuropsychia.py: A python module for creating experiments, tasks and questionnaires. *Journal of Open Source Software*, 2(19), 259.
- Mani, K., & Johnson-Laird, P. N. (1982). The mental representation of spatial descriptions. *Memory*, 10(2), 181–187.
- Mantel, B., Bardy, B. G., & Stoffregen, T. A. (2010). Multimodal perception of reachability expressed through locomotion. *Ecological Psychology*, 22(3), 192–211. <https://doi.org/10.1080/10407413.2010.496665>
- Maravita, A., Husain, M., Clarke, K., & Driver, J. (2001). Reaching with a tool extends visual-tactile interactions into far space. *Neuropsychologia*, 39, 580–585.
- Marr, D. (1982). *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. New York: Henry Holt and Company.
- Martin, A. (2007). The Representation of Object Concepts in the Brain. *Annual Review of Psychology*, 58(1), 25–45. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.57.102904.190143>
- Martin, A., Haxby, J. V., Lalonde, F. M., Wiggs, C. L., & Ungerleider, L. G. (1995). Discrete cortical regions associated with knowledge of color and knowledge of action. *Science*, 270(5233), 102–105.
- Maruff, P., & Velakoulis, D. (2000). The voluntary control of motor imagery. Imagined movements in individuals with feigned motor impairment and conversion disorder. *Neuropsychologia*, 38(9), 1251–1260. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(00\)00031-2](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(00)00031-2)
- McArdle, W., Katch, F., & Katch, V. (2008). *Exercise physiology: Nutrition, energy, and*

- human performance (7th ed.)*. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins.
- McCauley, M. E., & Sharkey, T. J. (1992). Cybersickness: Perception of self-motion in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, *1*(3), 311-318.
- McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1985). Distributed Memory and the Representation of General and Specific Information. *Journal of Experimental Psychology: General*, *114*(2), 159–188. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.114.2.159>
- McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, *5*(4), 115–133. <https://doi.org/10.1007/BF02478259>
- McNamara, T. P. (1986). Mental representations of spatial relations. *Cognitive Psychology*, *18*(1), 87–121. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(86\)90016-2](https://doi.org/10.1016/0010-0285(86)90016-2)
- McNamara, T. P. (1992). Spatial representation. *Geoforum*, *23*(2), 139–150. [https://doi.org/10.1016/0016-7185\(92\)90012-S](https://doi.org/10.1016/0016-7185(92)90012-S)
- McNamara, T. P., & LeSueur, L. L. (1989). Mental Representations of Spatial and Nonspatial Relations. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *41*(2), 215–233. <https://doi.org/10.1080/14640748908402362>
- Mcnaughton, B. L., Leonard, B., & Chen, L. (1989). Cortical-hippocampal interactions and cognitive mapping: A hypothesis based on reintegration of the parietal and inferotemporal pathways for visual processing. *Psychobiology*, *17*(3), 230–235. <https://doi.org/10.1007/BF03337774>
- Meilinger, T. (2008). The network of reference frames theory: a synthesis of graphs and cognitive maps. In C. Freska & N. Newcombe (Eds.), *Spatial Cognition VI. Learning, Reasoning, and Talking about Space* (pp. 340–360). Berlin: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-87601-4>
- Meilinger, T., Frankenstein, J., & Bühlhoff, H. H. (2013). Learning to navigate: Experience versus maps. *Cognition*, *129*(1), 24–30. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2013.05.013>
- Meilinger, T., Frankenstein, J., Simon, N., Bühlhoff, H. H., & Bresciani, J.-P. (2016). Not all memories are the same : Situational context influences spatial recall within one 's city of residency. *Psychonomic Bulletin & Review*, *23*(1), 246–252.

<https://doi.org/10.3758/s13423-015-0883-7>

- Mellet, E., Laou, L., Petit, L., Zago, L., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2010). Impact of the virtual reality on the neural representation of an environment. *Human Brain Mapping, 31*(7), 1065–1075. <https://doi.org/10.1002/hbm.20917>
- Memelink, J., & Hommel, B. (2013). Intentional weighting: A basic principle in cognitive control. *Psychological Research, 77*(3), 249–259. <https://doi.org/10.1007/s00426-012-0435-y>
- Menzel Jr., E. W. (1973). Chimpanzee spatial memory organization. *Science, 182*(4115), 943–945. Retrieved from <http://www.sciencemag.org/content/182/4115/943.short>
- Merleau-Ponty, M. (1945). *Phénoménologie de la Perception*. Paris: Gallimard.
- Mestre, D. (2006). Immersion and presence. In P. Fuchs & G. Moreau (Eds.), *Le Traité de la Réalité Virtuelle*. Paris: Presse des Mines. <https://doi.org/10.1201/b11612-8>
- Milgram, S., & Jodelet, D. (1976). Psychological maps of Paris. In H. M. Proshansky, W. H. Ittelson, & L. G. Rivlin (Eds.), *Environmental psychology: People and their physical settings* (pp. 104–124). New York: Holt, Rinehart and Wilson.
- Miller, O. M., & Voskuil, R. J. (1964). Thematic-map generalization. *Geographical Review, 54*(1), 13–19.
- Mittelstaedt, M.-L., & Mittelstaedt, H. (2001). Idiothetic navigation in humans: estimation of path length. *Experimental Brain Research, 139*(3), 318–332. <https://doi.org/10.1007/s002210100735>
- Moar, I., & Bower, G. H. (1983). Inconsistency in spatial knowledge. *Memory & Cognition, 11*(2), 107–113. <https://doi.org/10.3758/BF03213464>
- Montello, D. R. (1993). Scale and multiple psychologies of space. In A. U. Frank & I. Campari (Eds.), *Spatial Information Theory : a theoretical basis for GIS* (pp. 312–321). Berlin: Springer.
- Montello, D. R. (1997). The perception and cognition of environmental distance: Direct sources of information. In Stephen C. Hirtle & A. U. Frank (Eds.), *Spatial Information Theory : a theoretical basis for GIS* (pp. 297–311). Berlin: Springer-Verlag.

- Montello, D. R. (2009). A conceptual model of the cognitive processing of environmental distance information. In K. S. Hornsby, C. Claramunt, M. Denis, & G. Ligozat (Eds.), *Spatial Information Theory* (pp. 1–17). Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03832-7_1
- Montello, D. R., & Raubal, M. (2013). Functions And Applications Of Spatial Cognition. In David Waller & L. Nadel (Eds.), *Handbook of spatial cognition* (pp. 249–264). Washington: American Psychological Association.
- Morgado, N., Gentaz, É., Guinet, É., Osiurak, F., & Palluel-Germain, R. (2013). Within reach but not so reachable: Obstacles matter in visual perception of distances. *Psychonomic Bulletin and Review*, 20(3), 462–467. <https://doi.org/10.3758/s13423-012-0358-z>
- Morrow, D. G., Greenspan, S. L., & Bower, G. H. (1987). Accessibility and Situation Models in Narrative Comprehension. *Journal of Memory and Language*, 26(1), 165–187.
- Moyer, R. S., Bradley, D. R., Sorensen, M. H., Whiting, C., & Mansfield, D. P. (1978). Psychophysical functions for perceived and remembered size. *Science*, 200(4339), 330–332.
- Nadel, L. (2013). Cognitive maps. In David Waller & L. Nadel (Eds.), *Handbook of spatial cognition* (pp. 155–171). Washington: American Psychological Association.
- Neisser, U. (1982). Memory: what are the important questions. In *Memory Observed: Remembering in Natural Contexts* (pp. 3–19). San Francisco: Freeman.
- New, B., Pallier, C., Brysbaert, M., & Ferrand, L. (2004). Lexique 2: A new French lexical database. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, 36(3), 516–524. <https://doi.org/10.3758/BF03195598>
- Newcombe, N. (1985). Method for the study of spatial cognition. In R. Cohen (Ed.), *The Development of Spatial Cognition* (pp. 1–12). Hillsdale: Erlbaum Lawrence.
- Newell, A., & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Newton, I. (1687). *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Glasgow: Georgius Brookman.

- Nicolas, S. (2016). *Histoire de la psychologie* (2ème ed.). Paris: Dunod.
- Noë, A. (2004). *Action in perception*. Cambridge: MIT Press.
- Noordzij, M. L., & Postma, A. (2005). Categorical and metric distance information in mental representations derived from route and survey descriptions. *Psychological Research*, 69(3), 221–232. <https://doi.org/10.1007/s00426-004-0172-y>
- Noordzij, M. L., Zuidhoek, S., & Postma, A. (2006). The influence of visual experience on the ability to form spatial mental models based on route and survey descriptions. *Cognition*, 100(2), 321–342. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2005.05.006>
- O’Keefe, J. (1976). Place units in the hippocampus of the freely moving rat. *Experimental Neurology*, 51(1), 78–109. [https://doi.org/10.1016/0014-4886\(76\)90055-8](https://doi.org/10.1016/0014-4886(76)90055-8)
- O’Keefe, J., Burgess, N., Donnett, J. G., Jeffery, K. J., & Maguire, E. A. (1998). Place cells, navigational accuracy, and the human hippocampus. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 353(1373), 1333–1340. <https://doi.org/10.1098/rstb.1998.0287>
- O’Keefe, J., & Dostrovsky, J. (1971). The hippocampus as a spatial map. Preliminary evidence from unit activity in the freely-moving rat. *Brain Research*, 34(1), 171–175.
- O’Keefe, J., & Nadel, L. (1978). *The Hippocampus as a Cognitive Map*. Oxford: Clarendon Press.
- O’Regan, K. J., & Noë, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 939–1031.
- Okabe, A., Aoki, K., & Hamamoto, W. (1986). Distance and direction judgment in a large-scale natural environment. Effects of a slope and a winding trail. *Environment and Behavior*, 18(6), 755–772.
- Osiurak, F., Rossetti, Y., & Badets, A. (2017). What is an affordance? 40 years later. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.04.014>
- Paivio, A. (1971). *Imagery and verbal processes*. New York: Psychology Press.
- Pan, X., & Hamilton, A. F. d. C. (2018). Why and how to use virtual reality to study human

- social interaction: The challenges of exploring a new research landscape. *British Journal of Psychology*, 109(3), 395–417. <https://doi.org/10.1111/bjop.12290>
- Papaxanthis, C., Pozzo, T., Skoura, X., & Schieppati, M. (2002). Does order and timing in performance of imagined and actual movements affect the motor imagery process? The duration of walking and writing task. *Behavioural Brain Research*, 134(1–2), 209–215. [https://doi.org/10.1016/S0166-4328\(02\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S0166-4328(02)00030-X)
- 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. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.20.4.709>
- Parsons, T. D. (2015). Virtual reality for enhanced ecological validity and experimental control in the clinical, affective and social neurosciences. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9(DEC), 1–19. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00660>
- Pavlov, I. P. (1927). *Conditioned reflexes*. London: Routledge and Kegan Paul.
- Pazzaglia, F., Cornoldi, C., & De Beni, R. (2000). Differenze individuali nella rappresentazione dello spazio: presentazione di un questionario autovalutativo [Individual differences in spatial representation and in orientation ability: presentation of a self-report questionnaire]. *Giornale Italiano Di Psicologia*, 3, 627-650.
- Pazzaglia, F., & De Beni, R. (2001). Strategies of processing spatial information in survey and landmark-centred individuals. *European Journal of Cognitive Psychology*, 13(4), 493–508. <https://doi.org/10.1080/09541440125778>
- Pazzaglia, F., De Beni, R., & Meneghetti, C. (2007). The effects of verbal and spatial interference in the encoding and retrieval of spatial and nonspatial texts. *Psychological Research*, 71(4), 484–494. <https://doi.org/10.1007/s00426-006-0045-7>
- Pazzaglia, F., Gyselinck, V., Cornoldi, C., & De Beni, R. (2012). Individual differences in spatial text processing. In V. Gyselinck & F. Pazzaglia (Eds.), *From mental imagery to spatial cognition and language : essays in honour of Michel Denis* (pp. 137–171). Hove: Psychology Press.
- Pazzaglia, F., & Meneghetti, C. (2017). Acquiring spatial knowledge from different sources and perspectives: abilities, strategies and representations. In J. Zacks & H. A. Taylor

-
- (Eds.), *Representations in Mind and World. Essays inspired by Barbara Tversky* (pp. 120–134). New York: Routledge.
- Pazzaglia, F., & Taylor, H. a. (2007). Perspective, Instruction, and Cognitive Style in Spatial Representation of a Virtual Environment. *Spatial Cognition & Computation*, 7(February 2015), 349–364. <https://doi.org/10.1080/13875860701663223>
- Peebles, J. J. (1964). Rugged waters: Trails and campsites of Lewis and Clark in the Salmon River country. *Idaho Yesterdays*, 8, 2–17.
- Perrig, W., & Kintsch, W. (1985). Propositional and situational representations of text. *Journal of Memory and Language*, 24(5), 503–518.
- Péruch, P., Vercher, J. L., & Gauthier, G. M. (1995). Acquisition of Spatial Knowledge Through Visual Exploration of Simulated Environments. *Ecological Psychology*, 7(1), 1–20. https://doi.org/10.1207/s15326969eco0701_1
- Peters, R. (1978). Communication, Cognitive Mapping, and Strategy in Wolves and Hominids. In R. L. Hall & H. S. Sharp (Eds.), *Wolf and Man* (pp. 95–107). London: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-319250-9.50013-x>
- Pezzulo, G., Barca, L., Lamberti, A., & Borghi, A. M. (2010). When Affordances Climb into your Mind : Advantages of Motor Simulation in a Memory Task Performed by Novice and Expert Rock Climbers. *Brain and Cognition*, 73(1), 68–73.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1966). *L' image mentale chez l'enfant*. Paris: PUF.
- Piaget, J., Inhelder, B., & Szeminska, A. (1960). *The child's conception of geometry*. London: Routledge and Kegan Paul.
- Pick, H. L. (1972). Mapping Children-Mapping Space. In *the 80th Annual convention of the American Psychological Association*. Honolulu, Hawaii.
- Pimentel, K., & Texeira, K. (1993). *Virtual Reality : through the new looking glass*. New York: Windcrest.
- Plumert, J. M., Kearney, J. K., Cremer, J. F., & Recker, K. (2005). Distance Perception in Real and Virtual Environments. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2(3), 216–233. <https://doi.org/10.1145/1077399.1077402>

- Poincaré, H. (1902). *La Science et l'hypothèse*. Paris, France: Ernest Flammarion.
- Poincaré, H. (1905). *Science and Hypothesis*. New York: The Walter Scott Publishing Company.
- Poincaré, H. (1914). *Science et méthode*. Paris, France: Ernest Flammarion.
- Porter, J., Anand, T., Johnson, B., Khan, R. M., & Sobel, N. (2005). Brain mechanisms for extracting spatial information from smell. *Neuron*, 47(4), 581–592. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2005.06.028>
- Portugali, Y. (1993). *Implicate relations: Society and space in the Israeli-Palestinian conflict*. The Netherlands: Kruwer.
- Poucet, B. (1993). Spatial Cognitive Maps in Animals: New Hypotheses on Their Structure and Neural Mechanisms. *Psychological Review*, 100(2), 163–182. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.100.2.163>
- Poucet, B., Alvernhe, A., Hok, V., Renaudineau, S., Sargolini, F., & Save, E. (2010). L'hippocampe et le code neural de la mémoire spatiale. *Biologie Aujourd'hui*, 204(2), 103–112. <https://doi.org/10.1051/jbio/2010009>
- Premack, D., & Woodruff, G. (1978). Does the chimpanzee have a theory of mind. *The Behavioral and Brain Sciences*, 4, 515–526.
- Previc, F. H. (1998). The Neuropsychology of 3-D Space. *Psychological Bulletin*, 124(2), 123–164. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.124.2.123>
- Prinz, W. (1997). Perception and action planning. *European Journal of Cognitive Psychology*, 9(2), 129–154.
- Proffitt, D. R. (2006). Embodied Perception and the Economy of Action. *Perspectives on Psychological Science*, 1(2), 110–122. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6916.2006.00008.x>
- Proffitt, D. R., Bhalla, M., Gossweiler, R., & Midgett, J. (1995). Perceiving geographical slant. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2(4), 409–428. <https://doi.org/10.3758/BF03210980>
- Proffitt, D. R., Creem, S. H., & Zosh, W. D. (2001). Seeing mountains in Mole Hills: Geographical-Slant Perception. *Psychological Science*, 12(5), 418–423.

<https://doi.org/10.1111/1467-9280.00377>

- Proffitt, D. R., & Linkenauger, S. A. (2013). Perception Viewed as a Phenotypic Expression. In M. Beisert & A. Herwig (Eds.), *Action Science: Foundations of an Emerging Discipline* (pp. 171–197). Cambridge: MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/9780262018555.003.0007>
- Proffitt, D. R., Stefanucci, J., Banton, T., & Epstein, W. (2003). The role of effort in perceiving distance, *24*(3), 419–430.
- Pülvermüller, F. (1999). Words in the brain's language. *Behavioral and Brain Sciences*, *22*(2), 253–279. <https://doi.org/10.1017/s0140525x9900182x>
- Pylyshyn, Z. W. (1973). What the mind's eye tells the mind's brain: a critique of mental imagery. *Psychological Bulletin*, *80*(1).
- Pylyshyn, Z. W. (2003). *Seeing and visualizing: It's not what you think*. Cambridge: MIT Press.
- Quercia, D., Paulo Pesce, J., Almeida, V., & Crowcroft, J. (2013). Psychological maps 2.0: A web engagement enterprise starting in London. *WWW 2013 - Proceedings of the 22nd International Conference on World Wide Web*, 1065–1075.
- R Development Core Team. (2017). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Ranck, J. B. (1985). Head direction cells in the deep cell layer of dorsal presubiculum in freely moving rats, Budapest, 217–220. In G. Buzsáki & C. H. Vanderwolf (Eds.), *Electrical activity of the archicortex*. Budapest: Akademia Kiado.
- Rao, R. P. N., & Ballard, D. H. (1999). Predictive coding in the visual cortex: A functional interpretation of some extra-classical receptive-field effects. *Nature Neuroscience*, *2*(1), 79–87. <https://doi.org/10.1038/4580>
- Rebenitsch, L., & Owen, C. (2014). Individual variation in susceptibility to cybersickness. *UIST 2014 - Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 309–318. <https://doi.org/10.1145/2642918.2647394>
- Redish, A. D., & Ekstrom, A. (2013). Hippocampus and related areas: What the place cell

- literature tells us about cognitive maps in rats and humans. In D. Waller & L. Nadel (Eds.), *Handbook of spatial cognition* (pp. 15–34). Washington: American Psychological Association.
- Renner, R. S., Velichkovsky, B. M., & Helmert, J. R. (2013). The perception of egocentric distances in virtual environments - A review. *ACM Computing Surveys*, *46*(2), 1–40. <https://doi.org/10.1145/2543581.2543590>
- Riecke, B. E., Bodenheimer, B., McNamara, T. P., Williams, B., Peng, P., & Feuereissen, D. (2010). Do we need to walk for effective virtual reality navigation? Physical rotations alone may suffice. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (Vol. 6222 LNAI, pp. 234–247). https://doi.org/10.1007/978-3-642-14749-4_21
- Riecke, B. E., van Veen, H. A. H. C., & Bühlhoff, H. H. (2002). Visual Homing Is Possible Without Landmarks: A Path Integration Study in Virtual Reality. *Presence*, *11*(5), 443–473.
- Riener, C. R. (2005). *An influence of circadian rhythms and temperature on the perception of distance*. Charlottesville: University of Virginia.
- Rieser, J. J., Guth, D. A., & Hill, E. W. (1986). Sensitivity to perspective structure while walking without vision. *Perception*, *15*(2), 173–188. <https://doi.org/10.1068/p150173>
- 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*(3), 480–497.
- Rinck, M., & Bower, G. H. (2000). Temporal and spatial distance in situation models. *Memory and Cognition*, *28*(8), 1310–1320. <https://doi.org/10.3758/BF03211832>
- Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004). The mirror neuron system. *Annual Review of Neurosciences*, *27*, 169–192. <https://doi.org/10.1001/archneurol.2009.41>
- Roberts, R., Callow, N., Hardy, L., Markland, D., & Bringer, J. (2008). Movement imagery ability: Development and assessment of a revised version of the vividness of movement imagery questionnaire. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, *30*(2), 200–221. <https://doi.org/10.1123/jsep.30.2.200>

-
- Ruddle, R. A., & Lessels, S. (2009). The Benefits of Using a Walking Interface to Navigate Virtual Environments. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 16(1), 1–18.
- Ruddle, R. A., Volkova, E., & Bühlhoff, H. H. (2011). Walking improves your cognitive map in environments that are large-scale and large in extent. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 18(2), 1–20. <https://doi.org/10.1145/1970378.1970384>
- Ruddle, R. A., Volkova, E., Mohler, B., & Bühlhoff, H. H. (2011). The effect of landmark and body-based sensory information on route knowledge. *Memory and Cognition*, 39(4), 686–699. <https://doi.org/10.3758/s13421-010-0054-z>
- Rumelhart, D. E. (1974). The room theory. In *Unpublished computer listing, reported in Kuipers, B. J. (1977): Representing Knowledge of Large-Scale Space, Ph. D. thesis, MIT AI Lab technical report, 418*.
- Sadalla, E. K., Burroughs, W. J., & Staplin, L. J. (1980). Reference points in spatial cognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 6(5), 516–528. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.6.5.516>
- Sadalla, E. K., & Magel, S. G. (1980). The perception of traversed distance. *Environment and Behavior*, 12(1), 65–79.
- Sadalla, E. K., & Staplin, L. J. (1980). The Perception of Traversed Distance: Intersections. *Environment and Behavior*, 12(2), 167–182. <https://doi.org/10.1177/0013916580122003>
- Saint-Augustin. (1964). *Les confessions. Traduction française par J. Trabucco*. Tours: Garnier-Flammarion (Ouvrage original publié entre 397 et 401).
- Salas, C. R., Minakata, K., & Kelemen, W. L. (2011). Walking before study enhances free recall but not judgement-of-learning magnitude. *Journal of Cognitive Psychology*, 23(4), 507–513. <https://doi.org/10.1080/20445911.2011.532207>
- Sanchez-vives, M. V., & Slater, M. (2005). From Presence Towards Consciousness. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(10), 332. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.99.5596&rep=rep1&type=pdf>
- Sánchez, J., & Maureira, E. (2007). Subway Mobility Assistance Tools for Blind Users. In C. Stephanidis & M. Pieper (Eds.), *Universal Access in Ambient Intelligence Environments*

- (pp. 386–404). Berlin: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-71025-7>
- Sandström, C. I. (1951). *Orientation in the present space*. Stockholm: Almqvist et Wiksell.
- Satterthwaite, F. E. (1946). An Approximate Distribution of Estimates of Variance Components. *Biometrics Bulletin*, 2(6), 110–114. <https://doi.org/10.1002/9780470057339.vai016>
- Schiff, B. B., & Bassel, C. (1996). Effects of asymmetrical hemispheric activation on approach and withdrawal responses. *Neuropsychology*, 10, 557–564.
- Schmid-Hempel, P. (1986). Do honeybees get tired? The effect of load weight on patch departure. *Animal Behaviour*, 34(4), 1243–1250. [https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(86\)80183-X](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(86)80183-X)
- Schmid-Hempel, P., Kacelnik, A., & Houston, A. I. (1985). Honeybees maximize efficiency by not filling their crop. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 17(1), 61–66. <https://doi.org/10.1007/BF00299430>
- Schmuckler, M. (2001). What is Ecological Validity? *Infancy*, 2(4), 419–436.
- Schnall, S., Zadra, J. R., & Proffitt, D. R. (2010). Perception of Geographical Slant. *Perception*, 39(4), 464–482.
- Schubert, T., Friedmann, F., & Regenbrecht, H. (2001). The experience of presence: Factor analytic insights. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3), 266–281. <https://doi.org/10.1162/105474601300343603>
- Sekiyama, K. (1982). Kinesthetic aspects of mental representations in the identification of left and right hands. *Perception & Psychophysics*, 32(2), 89–95. <https://doi.org/10.3758/BF03204268>
- Senot, P., Zago, M., Lacquaniti, F., & McIntyre, J. (2005). Anticipating the effects of gravity when intercepting moving objects: Differentiating up and down based on nonvisual cues. *Journal of Neurophysiology*, 94(6), 4471–4480. <https://doi.org/10.1152/jn.00527.2005>
- Shanon, B. (1988). Semantic representation of meaning: A critique. *Psychological Bulletin*, 104(1), 70–83.
- Shelton, A. L., Burrows, J. J., Tversky, B., & Gabrieli, J. D. E. (2000). Effects of route and

- survey perspectives on brain activation during scene recognition. In *Thirtieth Annual Meeting of the Society for Neurosciences*.
- Sheridan, T. B. (1992). Musings on telepresence and virtual presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1(1), 120–126.
- Sholl, M. J. (1987). Cognitive maps as orienting schemata. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 13(4), 615.
- Siegel, A. W. (1981). The externalisation of cognitive maps by children and adults: In search of ways to ask better questions. In L. S. Liben, A. Patterson, & N. Newcombe (Eds.), *Spatial Representation and Behaviour Across the Life Span*. New York: Academic Press.
- Siegel, A. W., & Cousins, J. H. (1985). The symbolizing and symbolized child in the enterprise of cognitive mapping. In R. Cohen (Ed.), *The Development of Spatial Cognition* (pp. 347–368). Hillsdale: Erlbaum Lawrence.
- Skinner, B. F. (1976). *About behaviorsim*. New York: Random House.
- Slater, M. (2002). Presence and the sixth sense. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 11(4), 435–439. <https://doi.org/10.1162/105474602760204327>
- Slater, M. (2009). Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1535), 3549–3557. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0138>
- Smith, E. E. (1978). Theories of semantic memory. *Handbook of Learning and Cognitive Processes*, (6), 1–56.
- Spence, J. D. (1984). *The memory palace of Matteo Ricci*. Harmondsworth: Penguin Books.
- Spence, K. W., & Lippitt, R. (1946). An experimental test of the sign-gestalt theory of trial and error learning. *Journal of Experimental Psychology*, 36(6), 491–502. <https://doi.org/10.1037/h0062419>
- Spencer, C., Blades, M., & Morsley, K. (1989). *The Child in the Physical Environment*. Chichester: Wiley.
- Spencer, C., Spencer, C. J., Blades, M., & Morsley, K. (1989). *The child in the physical environment: The development of spatial knowledge and cognition*. John Wiley & Sons

- Inc.* Chichester: Wiley.
- Spiekermann, K., & Wegener, M. (1994). The shrinking continent: new time-space maps of Europe. *Environment & Planning B: Planning & Design*, 21(6), 653–673. <https://doi.org/10.1068/b210653>
- Stefanucci, J. K., & Geuss, M. N. (2009). Big People, Little World: The Body Influences Size Perception. *Perception*, 38(12), 1782–1795. <https://doi.org/10.1038/jid.2014.371>
- Stefanucci, J. K., Proffitt, D. R., Banton, T., & Epstein, W. (2005). Distances appear different on hills. *Perception and Psychophysics*, 67(6), 1052–1060. <https://doi.org/10.3758/BF03193631>
- Sternberg, R. J. (1988). *The triarchic mind: A new theory of human intelligence*. New York: Viking.
- Stevens, A., & Coupe, P. (1978). Distortions in judged spatial relations. *Cognitive Psychology*, 10(4), 422–437.
- Stevens, J. A. (2005). Interference effects demonstrate distinct roles for visual and motor imagery during the mental representation of human action. *Cognition*, 95, 329–350.
- Stoffregen, T. A., Bardy, B. G., Smart, L. J., & Pagulayan, R. J. (2003). On the nature and evaluation of fidelity in virtual environments. In L. Hettinger & M. Hass (Eds.), *Virtual and adaptive environments: Applications, implications, and human performance issues* (pp. 111–128). London: Lawrence Erlbaum Associates.
- Sugovic, M., Turk, P., & Witt, J. K. (2016). Perceived distance and obesity: It's what you weigh, not what you think. *Acta Psychologica*, 165, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2016.01.012>
- Sui, D. (2004). Tobler's First Law of Geography. *Annals of the Association of American Geographers*, 94(2), 269–277. <https://doi.org/10.4135/9781412952422.n299>
- Symes, E., Ellis, R., & Tucker, M. (2007). Visual object affordances: Object orientation. *Acta Psychologica*, 124(2), 238–255. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2006.03.005>
- Tai, N. C. (2012). Daylighting and its impact on depth perception in a daylight space. *Journal of Light and Visual Environment*, 36(1), 16–22. <https://doi.org/10.2150/jlve.36.16>

- Tardieu, H., Ehrlich, M. F., & Gyselinck, V. (1992). Levels of Representation and Domain-specific Knowledge in Comprehension of Scientific Texts. *Language and Cognitive Processes*, 7(3–4), 335–351. <https://doi.org/10.1080/01690969208409390>
- Taube, J. S. (2007). The Head Direction Signal: Origins and Sensory-Motor Integration. *Annual Review of Neuroscience*, 30(1), 181–207. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.29.051605.112854>
- Taylor-Covill, G. A. H., & Eves, F. F. (2014). When what we need influences what we see: Choice of energetic replenishment is linked with perceived steepness. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 40(3), 915–919.
- Taylor-Covill, G. A. H., & Eves, F. F. (2016). Carrying a biological “backpack”: Quasi-experimental effects of weight status and body fat change on perceived steepness. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 42(3), 331–338. <https://doi.org/10.1037/xhp0000137>
- Taylor, H. A., Naylor, S. J., & Chechile, N. A. (1999). Goal-specific influences on the representation of spatial perspective. *Memory and Cognition*, 27(2), 309–319. <https://doi.org/10.3758/BF03211414>
- Taylor, H. A., & Tversky, B. (1992). Spatial Mental Models Derived from Route and Survey Information, (April 1992). [https://doi.org/10.1016/0749-596X\(92\)90014-O](https://doi.org/10.1016/0749-596X(92)90014-O)
- Taylor, H. A., & Tversky, B. (1996). Perspective in spatial descriptions. *Journal of Memory and Language*, 35, 371–391.
- Taylor, J. E. T., Witt, J. K., & Sugovic, M. (2011). When walls are no longer barriers: Perception of wall height in parkour. *Perception*, 40(6), 757–760. <https://doi.org/10.1068/p6855>
- Tcheang, L., Bulthoff, H. H., & Burgess, N. (2011). Visual influence on path integration in darkness indicates a multimodal representation of large-scale space. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(3), 1152–1157. <https://doi.org/10.1073/pnas.1011843108>
- Tenhundfeld, N. L., & Witt, J. K. (2017). Distances on hills look farther than distances on flat ground: Evidence from converging measures. *Attention, Perception, and Psychophysics*,

- 79(4), 1165–1181. <https://doi.org/10.3758/s13414-017-1305-x>
- Thinus-Blanc, C., & Gaunet, F. (1997). Representation of space in blind persons: Vision as a spatial sense? *Psychological Bulletin*, *121*(1), 20–42. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.121.1.20>
- Thomson, D. M., & Tulving, E. (1973). Encoding specificity and retrieval processes in episodic memory. *Psychological Review*, *80*(5), 352–373.
- Thorndyke, P. W. (1981). Distance estimation from cognitive maps. *Cognitive Psychology*, *13*(4), 526–550. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(81\)90019-0](https://doi.org/10.1016/0010-0285(81)90019-0)
- Thorndyke, P. W., & Hayes-Roth, B. (1982). Differences in spatial knowledge acquired from maps and navigation. *Cognitive Psychology*, *14*(4), 560–589.
- Thurrell, A., Pelah, A., & Distler, H. K. (1998). The influence of non-visual signals of walking on the perceived speed of optic flow. *Perception*, *27*, 147–148.
- Tobler, W. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, *46*, 234–240.
- Todd, J. T., Oomes, A. H. J., Koenderink, J. J., & Kappers, A. M. L. (2001). On the affine structure of perceptual space. *Psychological Science*, *12*(3), 191–196. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00335>
- Tolman, E. C. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review*, *55*(4), 189–208.
- Tolman, E. C., Ritchie, B. F., & Kalish, D. (1946). Studies in spatial learning. II. Place learning versus response learning. *Journal of Experimental Psychology*, *36*(3), 221.
- Tomporowski, P. D. (2003). Effects of acute bouts of exercise on cognition. *Acta Psychologica*, *112*(3), 297–324. [https://doi.org/10.1016/S0001-6918\(02\)00134-8](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(02)00134-8)
- Trowbridge, C. C. (1913). On fundamental methods of orientation and “imaginary maps.” *Science*, *38*(990), 888–897.
- Tucker, M., & Ellis, R. (1998). On the Relations Between Seen Objects and Components of Potential Actions. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *24*(3), 830–846. Retrieved from papers3://publication/uuid/2A078162-

B0C4-4A3D-AA0B-016284D1C5C3

- Tucker, M., & Ellis, R. (2004). Action priming by briefly presented objects. *Acta Psychologica*, 116(2), 185–203. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2004.01.004>
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory data analysis*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.
- Tulving, E. (1972). Episodic and Semantic memory. In E. Tulving & W. Donaldson (Eds.), *Organization of memory* (pp. 381–403). New York: Academic Press.
- Turvey, M. T., & Shaw, R. E. (1995). Toward an ecological physics and a physical psychology. *The Science of the Mind: 2001 and Beyond*, 144–169.
- Tversky, B. (1981). Distortions in memory for maps. *Cognitive Psychology*, 13(3), 407–433.
- Tversky, B. (1991). Spatial mental models. In *The Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 27, pp. 109–145). New York: Academic Press.
- Tversky, B. (1993). Cognitive maps, cognitive collages and spatial mental models. In A. U. Franck & I. Campari (Eds.), *Spatial Information Theory: a theoretical basis for GIS, proceedings COSIT '93* (pp. 14–24). Berlin: Springer.
- Tversky, B. (2000). Some Ways that Maps and Diagrams Communicate. In C. Freksa, W. Brauer, C. Habel, & K. F. Wender (Eds.), *Spatial Cognition II: Integration abstract theories, empirical studies, formal models, and powerful applications* (pp. 72–79). Berlin.
- Tversky, B. (2003). Structures of mental spaces: How people think about space. *Environment and Behavior*, 35(1), 66–80. <https://doi.org/10.1177/0013916502238865>
- Tversky, B. (2005). Functional Significance of Visuospatial Representations. In P. Shah & A. Miyake (Eds.), *The Cambridge Handbook of Visuospatial Thinking* (pp. 1–34). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511610448.002>
- Tversky, B. (2009). Spatial cognition embodied and situated. In *The Cambridge Handbook of Situated Cognition* (pp. 201–216). Cambridge: Cambridge University Press.
- Van den Bergh, O., Vrana, S., & Eelen, P. (1990). Letters From the Heart: Affective Categorization of Letter Combinations in Typists and Nontypists. *Journal of*

-
- Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 16(6), 1153–1161.
<https://doi.org/10.1037/0278-7393.16.6.1153>
- van der Hoort, B., Guterstam, A., & Ehrsson, H. H. (2011). Being barbie: The size of one's own body determines the perceived size of the world. *PLoS ONE*, 6(5).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0020195>
- Varela, F. J. (1989). *Connaître les sciences cognitives. Tendances et perspectives*. Paris: Editions du Seuil.
- Varela, F. J., Maturana, H. R., & Uribe, R. (1974). Autopoiesis: the organization of living systems, its characterization and a model. *Biosystems*, 5(4), 187–196.
- Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E. (1993). *The embodied mind*. Cambridge: MIT Press.
- Varnava, A., McCarthy, M., & Beaumont, J. G. (2002). Line bisection in normal adults: Direction of attentional bias for near and far space. *Neuropsychologia*, 40, 1372–1378.
[https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(01\)00204-4](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(01)00204-4)
- Versace, R., Vallet, G. T., Riou, B., Lesourd, M., Labeye, É., & Brunel, L. (2014). Act-In: An integrated view of memory mechanisms. *Journal of Cognitive Psychology*, 26(3), 280–306. <https://doi.org/10.1080/20445911.2014.892113>
- Voss, J. L., Gonsalves, B. D., Federmeier, K. D., Tranel, D., & Cohen, N. J. (2011). Hippocampal brain-network coordination during volitional exploratory behavior enhances learning. *Nature Neuroscience*, 14(1), 115–120.
<https://doi.org/10.1002/cnrc.27633>
- Waller, David, & Greenauer, N. (2007). The role of body-based sensory information in the acquisition of enduring spatial representations. *Psychological Research*, 71(3), 322–332.
<https://doi.org/10.1007/s00426-006-0087-x>
- Waller, David, Loomis, J., & Haun, D. B. M. (2004). Body-based senses enhance knowledge of directions in large-scale environments. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11(1), 157–163.
- Waller, David, & Richardson, A. R. (2008). Correcting distance estimates by interacting with immersive virtual environments: Effects of task and available sensory information. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 14, 61–72.

-
- Walmsley, D. J., Saarinen, T. F., & MacCabe, C. L. (1990). Down under or centre stage? the world images of australian students. *Australian Geographer*, *21*(2), 164–173. <https://doi.org/10.1080/00049189008703012>
- Wang, Q., Taylor, H. A., & Brunyé, T. T. (2012). When going the right way is hard to do: Distinct phases of action compatibility in spatial knowledge development. *Acta Psychologica*, *139*(3), 449–457. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2012.01.006>
- Wang, Q., Taylor, H. A., & Brunyé, T. T. (2018). Action compatibility in spatial knowledge developed through virtual navigation. *Psychological Research*, *0*(0), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s00426-018-0972-0>
- Warren, W. H. (1984). Perceiving affordances: visual guidance of stair climbing. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *10*(5), 683–703. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/6238127>
- Warren, W. H., Rothman, D. B., Schnapp, B. H., & Ericson, J. D. (2017). Wormholes in virtual space: From cognitive maps to cognitive graphs. *Cognition*, *166*, 152–163. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2017.05.020>
- Warren, W. H., & Whang, S. (1987). Visual Guidance of Walking Through Apertures: Body-Scaled Information for Affordances. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *13*(3), 371–383. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.13.3.371>
- Warrington, E., & Shallice, T. (1984). Category Specific Semantic Impairments. *Brain*, *107*, 829–853.
- Waters, W., & Winter, S. (2011). A wayfinding aid to increase navigator independence. *Journal of Spatial Information Science*, *3*(2011), 103–122. <https://doi.org/10.5311/JOSIS.2011.3.43>
- Watson, J. B. (1913). Psychology as the behaviorist views it. *Psychological Review*, *20*(2), 158–177.
- Weber, K. D., Fletcher, W. A., Gordon, C. R., Melvill Jones, G., & Block, E. W. (1998). Motor learning in the “podokinetic” system and its role in spatial orientation during locomotion. *Experimental Brain Research*, *120*(3), 377–385.

<https://doi.org/10.1007/s002210050411>

- Weisberg, S. M., & Newcombe, N. S. (2016). How Do (Some) People Make a Cognitive Map? Routes, Places, and Working Memory. *Journal of Experimental Psychology*, *42*(5), 768–785. <https://doi.org/10.1037/a0027389>
- Wertsch, J. V. (1998). *Mind as action*. Oxford: Oxford University Press.
- Wesp, R., Cichello, P., Gracia, E. B., & Davis, K. (2004). Observing and engaging in purposeful actions with objects influences estimates of their size. *Perception and Psychophysics*, *66*(8), 1261–1267. <https://doi.org/10.3758/BF03194996>
- Wesp, R., & Gasper, J. (2012). Is size misperception of targets simply justification for poor performance? *Perception*, *41*(8), 994–996. <https://doi.org/10.1068/p7281>
- Wesp, R., Hesse, J., Keutmann, D., & Wheaton, K. (2001). Gestures maintain spatial imagery. *American Journal of Psychology*, *114*(4), 591–600. <https://doi.org/10.2307/1423612>
- White, E. (2012). *The role of multimodally specified effort in action-relevant distance perception (Unpublished doctoral dissertation)*. University of Cincinnati.
- White, E., Shockley, K., & Riley, M. A. (2013). Multimodally specified energy expenditure and action-based distance judgments. *Psychonomic Bulletin and Review*, *20*(6), 1371–1377. <https://doi.org/10.3758/s13423-013-0462-8>
- Wiener, J. M., Büchner, S. J., & Hölscher, C. (2009). Taxonomy of Human Wayfinding Tasks: A Knowledge-Based Approach. *Spatial Cognition & Computation*, *9*(2), 152–165. <https://doi.org/10.1080/13875860902906496>
- Wilson, M. (2002). Six views on embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, *9*(4), 625–636.
- Wilson, P. N., Foreman, N., Gillett, R., & Stanton, D. (1997). Active Versus Passive Processing of Spatial Information in a Computer-Simulated Environment. *Ecological Psychology*, *9*(3), 207–222. <https://doi.org/10.1207/s15326969eco0903>
- Wilson, P. N., & Péruch, P. (2002). The influence of interactivity and attention on spatial learning in a desk-top virtual environment. *Cahiers De Psychologie Cognitive/Current Psychology of Cognition*, *21*, 601–633.

- Wilson, R. A. (1994). Wide computationalism. *Mind*, *103*(411), 351–372. <https://doi.org/10.1093/mind/103.411.351>
- Witmer, B. G., Jerome, C. J., & Singer, M. J. (2005). The factor structure of the presence questionnaire. *Presence*, *14*(3), 298–312.
- Witmer, B. G., & Sadowski, W. J. (1998). Nonvisually guided locomotion to a previously viewed target in real and virtual environments. *Human Factors*, *40*(3), 478–488. <https://doi.org/10.1518/001872098779591340>
- Witt, J. K. (2017). Action potential influences spatial perception: Evidence for genuine top-down effects on perception. *Psychonomic Bulletin and Review*, *24*(4), 999–1021. <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1184-5>
- Witt, J. K., Linkenauger, S. A., Bakdash, J. Z., Augustyn, J. S., Cook, A. J., & Proffitt, D. R. (2009). The Long Road of Pain: Chronic Pain Increases Perceived Distance. *Experimental Brain Research*, *192*(1), 154–148.
- Witt, J. K., Linkenauger, S. A., & Wickens, C. (2016). Action-specific effects in perception and their potential applications. *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, *5*(1), 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.jarmac.2015.07.008>
- Witt, J. K., & Proffitt, D. R. (2005). See the ball, hit the ball: Apparent ball size is correlated with batting average. *Psychological Science*, *16*(12), 937–938. Retrieved from <http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&PAGE=reference&D=emed7&NEWS=N&AN=16313656>
- Witt, J. K., & Proffitt, D. R. (2008). Action-specific Influences on Distance Perception: A Role for Motor Simulation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *34*(6), 1479–1492.
- Witt, J. K., Proffitt, D. R., & Epstein, W. (2005). Tool Use Affects Perceived Distance, But Only When You Intend to Use It. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *31*(5), 880–888. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.31.5.880>
- Witt, J. K., Schuck, D. M., & Taylor, J. E. T. (2011). Action-specific effects underwater. *Perception*, *40*(5), 530–537. <https://doi.org/10.1068/p6910>

-
- Witt, J. K., & Sugovic, M. (2010). Performance and ease influence perceived speed. *Perception, 39*(10), 1341–1353. <https://doi.org/10.1068/p6699>
- Wolbers, T., & Hegarty, M. (2010). What determines our navigational abilities? *Trends in Cognitive Sciences, 14*(3), 138–146. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.01.001>
- Wood, D., & Beck, R. (1989). Janine Eber maps London: Individual dimensions of cognitive imagery. *Journal of Environmental Psychology, 9*(1), 1–26.
- Woodworth, R. S. (1938). *Experimental psychology*. New York: Henry Holt.
- Yates, F. (1966). *The art of memory* (Vol. III). New York: Routledge and Kegan Paul.
- Zadra, J. R., Weltman, A. L., & Proffitt, D. R. (2016). Walkable distances are bioenergetically scaled. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 42*(1), 39–51.
- Zetsche, C., Wolter, J., Galbraith, C., & Schill, K. (2009). Representation of space: image-like or sensorimotor? *Spatial Vision, 22*(5), 409–424. <https://doi.org/10.1163/156856809789476074>
- Zwaan, R. A., & Radvansky, G. A. (1998). Situation models in language and memory. *Psychological Bulletin, 123*(2), 162–185. Retrieved from <https://search-proquest-com.proxy.library.carleton.ca/docview/614398538/fulltextPDF/F8C6586362BD435FPQ/1?accountid=9894>
- Zwaan, R. A., Stanfield, R. A., & Yaxley, R. H. (2002). Language Comprehenders Mentally Represent the Shapes of Objects. *Psychological Science, 13*(2), 168–171.
- Zwaan, R. A., & Taylor, L. J. (2006). Seeing, acting, understanding: Motor resonance in language comprehension. *Journal of Experimental Psychology: General, 135*(1), 1–11. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.135.1.1>

10. ANNEXES

ANNEXE 1 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES QUESTIONNAIRES DE L 'ETUDE 1

Means for control measures along the four independent groups (SD in brackets)

Condition	Age (years)	Height (meters)	Weight (kilograms)	Daily walking frequency (minutes)	Map usage frequency (5 points scale)	Perceived cognitive difficulty of the task (5 points scale)	Perceived physical difficulty of the task (5 points scale)
Control (no walk)	22.80 (5.93)	1.67 (0.07)	58.03 (7.41)	58.80 (63.0)	0.95 (0.89)	1.80 (0.70)	0.20 (0.41)
Encoding only	21.57 (3.47)	1.71 (0.10)	62.05 (11.86)	80.60 (60.3)	0.95 (0.87)	1.52 (0.75)	0.48 (0.81)
Encoding + Retrieval	21.95 (3.89)	1.67 (0.08)	62.87 (9.39)	62.20 (51.3)	0.95 (0.85)	1.63 (0.50)	0.68 (0.82)

ANNEXE 2 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES QUESTIONNAIRES DE L 'ETUDE 2

Means for each variable of group matching, SD in brackets

Walking Effort Manipulation	Physical / Demographic Information			Walking / Sports Habits		Spatial Habits (scales from 0 to 3)				Difficulty / Costs Estimates (scales from 0 to 3)			
	Age (Years)	Height (cm)	Mass (kg)	Walk Time (minutes per day)	Sports Practice (minutes per week)	GPS Use	Route Planning Application Use	New Routes and Places Frequency	Difficulty learning new routes and places	Global Difficulty of the Study	Physical Cost of the Study	Cognitive Cost of the Study	Global Satisfaction about the Performance
Weighted	24.04 (5.50)	169 (7)	62.58 (7.82)	70.31 (40.23)	109 (131)	1.29 (1.04)	1.92 (.83)	1.38 (.92)	.92 (.88)	1.21 (.66)	.50 (.78)	1.63 (.82)	1.75 (.74)
Non- Weighted	23.48 (5.62)	167 (8)	64.48 (13.36)	69.89 (43.99)	88 (107)	1.09 (.90)	1.96 (1.02)	1.52 (.90)	1 (.95)	1 (.74)	.52 (.79)	1.54 (.81)	1.87 (.87)
Retrieval Only				22.95 (6.32)	1.69 (0.08)	61.25 (11.50)	66.00 (39.8)	1.35 (0.99)	1.95 (0.83)	0.15 (0.36)			

ANNEXE 3 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES QUESTIONNAIRES DE L'ETUDE 3 – EXPERIENCE 1

Table 1
Means and standard deviation for selected items and sub-scales of the habits questionnaire and the short BSRI scale (experiment 1).

	Demographic information & Habits										BSRI Questionnaire		
	Age (Years)	Height (cm)	Weight (kg)	Sport Practice (hours per week)	Video Games Practice (hours per week)	Walk Time (minutes per day)	Video-Games Frequency (from 1 to 4)	Maps Use Frequency (from 1 to 4)	Sports Estimated Frequency	Walking Estimated Frequency	Preference for Walking instead of Public Transportation	Femininity Sub-scale Score	Masculinity Sub-scale Score
Mean	21.53	169.16	61.22	2.81	1.97	49.69	1.56	2.31	2.75	3	2.75	5.4	4.59
SD	3.58	8.26	10	2.36	5.10	28.04	.83	1.16	.71	.35	.71	.6	.74

Table 2
Means and standard deviation for selected items and sub-scales of the Presence questionnaire and the QSR (experiment 1).

	Presence Questionnaire			Questionnaire on Spatial Representations						
	Realism	Possibility of Acting	Quality of the Interface	Possibility of Examining	Evaluation of the Performance	Global Spatial Abilities Estimation	Cardinal Directions Strategy Preference	Survey Perspective Preference	Route Perspective Preference	Landmark Centered Preference
Mean	32.88	22.18	14.69	16.79	10.38	16.31	5.91	7.75	7.19	8.25
SD	7.79	3.7	3.49	3.23	2.43	5.18	2.88	2.55	1.76	1.44

ANNEXE 4 : SCORES MOYENS SELON LE RANG DE L'ITINERAIRE DE L'ETUDE 3 – EXPERIENCE 1

Table 3
Mean scores for each rank of the route learning trials, SD in brackets (experiment 1)

	GMDA software scores derived from the landmark position retrieval task			Other Tasks			
	Distance Accuracy	Angle Accuracy	Correlation	Scale	Route Decision Task	Landmark Recognition Task	Estimated Walking Speed
Trial n°1	.832 (.063)	.73 (.143)	.642 (.27)	.55 (.276)	.844 (.142)	.749 (.189)	94 (63.6)
Trial n°2	.866 (.056)	.782 (.157)	.804 (.189)	.724 (.196)	.840 (.136)	.723 (.161)	87.5 (51.1)
Trial n°3	.875 (.05)	.813 (.136)	.844 (.129)	.733 (.167)	.797 (.212)	.764 (.211)	101 (60.7)
Trial n°4	.862 (.063)	.791 (.157)	.764 (.226)	.647 (.244)	.827 (.139)	.746 (.21)	106 (66.2)

ANNEXE 5 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES QUESTIONNAIRES DE L'ETUDE 4

Table 1
Mean and t tests for group matching (SD in brackets).

	Demographic information & Habits Questionnaire											
	Age (Years)	Height (cm)	Weight (kg)	Sport Practice (hours per week)	Walk Time (minutes per day)	Video-Games Time (hours per week)	Previous Experience With HMD (from 0 to 1)	Motion Sickness Frequency (from 0 to 3)	Global Estimated Difficulty of the Task (from 0 to 3)	Estimated Cognitive Difficulty (from 0 to 3)	Estimated Physical Difficulty (from 0 to 3)	Global Satisfaction about Performances
Active Condition	22.8 (4.51)	168.3 (9.05)	59.33 (10.52)	1.73 (1.8)	46.33 (26.81)	0.93 (1.08)	0.47 (0.51)	0.73 (0.78)	0.2 (0.41)	0.60 (0.72)	0.13 (0.51)	1.73 (0.69)
Passive Condition	23.93 (5.98)	170.73 (7.04)	69.37 (15.51)	2.7 (2.75)	69 (39.71)	1.2 (1.24)	0.67 (0.48)	0.93 (0.69)	0.27 (0.45)	0.67 (0.71)	0.07 (0.25)	2.20 (0.66)
t test value (p.value)	-0.83 (.41)	-1.15 (.26)	-2.93 (.005)	-0.51 (.61)	-2.59 (.01)	-0.89 (.38)	-1.57 (.12)	-1.05 (.29)	-0.6 (.55)	-0.36 (.72)	0.64 (.52)	-2.67 (.01)

ANNEXE 6 : QUESTIONNAIRE SUR LES REPRESENTATIONS SPATIALES UTILISE DANS LES ETUDES 1 A 3

Questionnaire sur les représentations spatiales

ID :

Utilisez les échelles fournies pour répondre aux questions posées en entourant le chiffre correspondant à votre réponse : il n'y a ni bonne , ni mauvaise réponse.

Si vous souhaitez poser des questions, n'hésitez pas à les poser maintenant.

1. Pensez-vous posséder un bon sens de l'orientation ?

1 2 3 4 5
(pas du tout) (tout à fait)

2. Êtes-vous considéré(e) par votre famille et vos amis comme ayant un bon sens de l'orientation?

1 2 3 4 5
(pas du tout) (tout à fait)

3. Pensez à la façon dont vous vous orientez dans différents environnements. Est-ce que vous vous décririez comme :

a) une personne qui s'oriente en se rappelant les trajets qui connectent un lieu à un autre ?

1 2 3 4 5
(pas du tout) (tout à fait)

b) une personne qui s'oriente en cherchant les points de repère (bâtiments, monuments, intersections) ?

1 2 3 4 5
(pas du tout) (tout à fait)

c) une personne qui cherche à se créer une carte mentale de l'environnement ?

1 2 3 4 5
(pas du tout) (tout à fait)

4. Pensez à une ville qui vous est peu familière. Écrivez son nom.....

Essayez maintenant de caractériser votre représentation de cette ville :

a) représentation vue de haut, qui ressemble à une représentation cartographique ?

1 2 3 4 5
(pas du tout) (tout à fait)

b) représentation en trajet, basée sur une mémorisation de l'itinéraire ?

1 2 3 4 5
(pas du tout) (tout à fait)

c) représentation centrée sur les repères, basée sur une mémorisation de repères saillants pris isolément (tels que monuments, bâtiments, intersections) ?

1 2 3 4 5
(pas du tout) (tout à fait)

5. Quand vous êtes dans un environnement naturel (montagnes, bord de mer, campagne), essayez vous naturellement de situer les points cardinaux (nord, sud, est et ouest) ?

1 2 3 4 5
(pas du tout) (tout à fait)

ANNEXE 7 : QUESTIONNAIRE D'HABITUDES UTILISE DANS LES ETUDES 1 ET 2

Nom : Prénom : Age :
 Niveau d'études : Taille : Poids :

- 1) Pratiquez-vous régulièrement une activité sportive ? OUI NON
- 2) A quelle fréquence (heures/semaine) ?
- 3) Pratiquez-vous la randonnée ?
 TOUT LE TEMPS SOUVENT UN PEU PAS DU TOUT
- 4) Combien de temps marchez-vous à pied au quotidien, en moyenne ?

- 5) Possédez-vous le permis de conduire ? AUTO MOTO LES DEUX
 AUCUN
 Depuis combien de temps ?
- 6) Utilisez-vous régulièrement un GPS ?
 TOUT LE TEMPS SOUVENT UN PEU PAS DU TOUT
- 7) Utilisez-vous régulièrement une application de planification de trajet ?
 TOUT LE TEMPS SOUVENT UN PEU PAS DU TOUT
- 8) Etes-vous souvent confrontés à des trajets nouveaux dans l'exercice de votre travail ou dans le cadre de vos loisirs ?
 TOUT LE TEMPS SOUVENT UN PEU PAS DU TOUT
- 9) Eprenez-vous des difficultés à mémoriser les trajets nouveaux ?
 TOUT LE TEMPS SOUVENT UN PEU PAS DU TOUT
- 10) Avez-vous souvent recours à des cartes afin de vous orienter ?
 TOUT LE TEMPS SOUVENT UN PEU PAS DU TOUT
- 11) Quel est votre métier/job actuel ?
- 12) Avez-vous déjà travaillé dans un métier ayant requis des capacités spatiales particulières ? (ex : coursier, livreur, chauffeur...)

Concernant l'expérience que vous venez de réaliser :

- 13) Avez-vous trouvé l'expérience difficile ?
 TOUT A FAIT PLUTOT UN PEU PAS DU TOUT
- 14) Les tâches que vous avez réalisées vous ont elles semblé coûteuses sur le plan COGNITIF ?
 TOUT A FAIT PLUTOT UN PEU PAS DU TOUT
- 15) Les tâches que vous avez réalisées vous ont elles semblé coûteuses sur le plan PHYSIQUE ?
 TOUT A FAIT PLUTOT UN PEU PAS DU TOUT
- 16) Etes-vous globalement satisfait(e) de votre performance ?
 TOUT A FAIT PLUTOT UN PEU PAS DU TOUT

ANNEXE 8 : ITEMS UTILISES POUR LE QUESTIONNAIRE D'HABITUDES DANS L'ETUDE 3

- Selon vous, à quelle fréquence pratiquez-vous des activités sportives ?
- Utilisez-vous régulièrement un GPS ?
- Utilisez-vous régulièrement une application de planification de trajet ?
- Etes-vous souvent confronté à des trajets nouveaux dans l'exercice de votre travail ou dans le cadre de vos loisirs ?
- Eprenez-vous des difficultés à mémoriser les trajets nouveaux ?
- Avez-vous souvent recours à des cartes afin de vous orienter ?
- Selon vous, à quelle fréquence marchez-vous dans la journée ?
- Vous arrive-t-il de préférer marcher plutôt que de prendre les transports en commun, quitte à mettre plus de temps pour arriver à destination ?
- A quelle fréquence pratiquez-vous la randonnée pédestre?
- A quelle fréquence pratiquez-vous la course à pied ou le footing ?
- A quelle fréquence jouez-vous aux jeux-vidéos ?

ANNEXE 9 : QUESTIONNAIRE BSRI VERSION COURTE UTILISE DANS L'ETUDE 3

- 1: "je suis sûr de moi"
- 2: "j'ai des qualités de commandement"
- 3: "je suis dominateur(trice)"
- 4: "j'ai une forte personnalité"
- 5: "je suis énergique"
- 6: "je suis agressif(ve)"
- 7: "je prends volontiers position (pour des idées)"
- 8: "je suis indépendant(e)"
- 9: "je défends mes opinions"
- 10: "j'accepte de prendre des risques"
- 11: "je suis compréhensif(ve)"
- 12: "je suis toujours prêt(e) à écouter les autres"
- 13: "je suis toujours prêt(e) à consoler les gens"
- 14: "je suis attentif(ve) aux besoins des autres"
- 15: "je suis sensibles aux peines et aux problèmes des autres"
- 16: "j'aime les enfants"
- 17: "je suis affectueux(se)"
- 18: "je suis doux(ce)"
- 19: "je suis chaleureux(se)"
- 20: "je suis tendre"

ANNEXE 10 : QUESTIONNAIRE D'HABITUDES UTILISE DANS L'ETUDE 4

- 1) Pratiquez-vous régulièrement une activité sportive ? OUI / NON
- 2) A quelle fréquence (heures/semaine) ?
- 3) Pratiquez-vous la randonnée ?
TOUT LE TEMPS / SOUVENT / UN PEU / PAS DU TOUT
- 4) Combien de temps marchez-vous à pied au quotidien, en moyenne ?
.....
- 5) A quelle fréquence jouez-vous aux jeux-vidéos ?
TOUS LES JOURS / ASSEZ REGULIEREMENT / RAREMENT /
JAMAIS
- 6) Combien d'heures par semaine jouez-vous à des jeux-vidéo PC / CONSOLE ? (en moyenne)
.....
- 7) Combien d'heures par semaines jouez-vous à des jeux-vidéo SMARTPHONE ? (en moyenne)
.....
- 8) Avant cette expérience, aviez-vous déjà essayé un casque de réalité virtuelle immersive ?
OUI / NON
- 9) Avez-vous déjà ressenti des symptômes de mal des transports ? (nausées, maux de tête, vertiges...)
A CHAQUE TRAJET / ASSEZ REGULIEREMENT / RAREMENT /
JAMAIS
- 10) Avez-vous ressenti des symptômes de cinétose / « motion sickness » analogues au mal des transports ou au mal de mer durant cette expérience ? (nausées, maux de tête, vertiges...)
OUI / NON
- 11) Si oui, veuillez estimer à quel point ces symptômes d'inconfort vous ont gêné / empêché de réaliser la tâche correctement :
INCONFORT TROP IMPORTANT / INCONFORT SUPPORTABLE / INCONFORT PEU PERCEPTIBLE /
AUCUN INCONFORT

Concernant l'expérience que vous venez de réaliser :

- 12) Avez-vous trouvé l'expérience difficile ?
TOUT A FAIT / PLUTOT / UN PEU / PAS DU TOUT
- 13) Les tâches que vous avez réalisées vous ont-elles semblé coûteuses sur le plan COGNITIF ?
TOUT A FAIT / PLUTOT / UN PEU / PAS DU TOUT
- 14) Les tâches que vous avez réalisées vous ont-elles semblé coûteuses sur le plan PHYSIQUE ?
TOUT A FAIT / PLUTOT / UN PEU / PAS DU TOUT
- 15) Etes-vous globalement satisfait(e) de votre performance ?
TOUT A FAIT / PLUTOT / UN PEU / PAS DU TOUT

ANNEXE 11 : QUESTIONNAIRE D'IMAGERIE MOTRICE UTILISE DANS L'ETUDE 4

L'imagerie de mouvement renvoie à la capacité à imaginer un mouvement. Le but de ce questionnaire est de déterminer la vivacité de votre imagerie de mouvement. Les items de ce questionnaire décrivent des mouvements, et sont conçus pour susciter des images dans votre esprit. Votre tâche est d'évaluer la vivacité de l'image suscitée par chaque item sur une échelle de 1 à 5. Pour cela, veuillez entourer le chiffre approprié dans la case proposée (ou correspondante). Dans la première colonne, notez l'image que vous avez de vous-même exécutant le mouvement d'un point de vue externe, comme si vous regardiez une image de vous-même) (Imagerie Visuelle Externe). Dans la seconde colonne, notez l'image que vous avez d'un point de vue interne, comme si vous regardiez avec vos propres yeux pendant que vous exécutez le mouvement (Imagerie Visuelle Interne). Dans la troisième colonne, notez l'image du ressenti que vous auriez de ce mouvement si vous l'exécutiez (Imagerie Kinesthésique). Essayez de faire chaque item séparément, sans tenir compte de la façon dont vous avez fait les autres. Remplissez tous les items d'un point de vue externe, puis retournez au début du questionnaire pour remplir les items de perspective visuelle interne, retournez enfin au début pour remplir les items concernant votre ressenti du mouvement. Les trois notes pour un item donné peuvent ne pas être les mêmes dans les trois cas. Lorsque vous imaginez un item, veuillez garder vos yeux FERMÉS.

Pensez à chacune des actions qui vous sont présentées à la page suivante et évaluez les images qu'elles suscitent selon leur clarté et leur vivacité sur cette ECHELLE DE NOTATION.

ECHELLE DE NOTATION

L'image suscitée par chaque item peut être :

- Parfaitement nette, aussi précise et vivace qu'une véritable perception ou un véritable ressenti.....1
- Relativement nette, presque aussi vivace qu'une perception.....2
- Moyennement nette et vivace.....3
- Vague et imprécise.....4
- Aucune image, vous "savez" seulement que vous y pensez.....5

Item	Regarder vous-même exécutant le mouvement (Imagerie Visuelle Externe)					Regarder à travers vos yeux pendant que vous exécutez le mouvement (Imagerie Visuelle Interne)					Ressentir vous-même faisant le mouvement (Imagerie Kinesthésique)				
	Parfaitement nette, aussi précise et vivace qu'une	Relativement nette, presque aussi vivace	Moyennement nette et vivace	Vague et imprécise	Aucune image, vous "savez" seulement que	Parfaitement nette, aussi précise et vivace qu'une	Relativement nette, presque aussi vivace	Moyennement nette et vivace	Vague et imprécise	Aucune image, vous "savez" seulement que vous y pensez.	Parfaitement nette, aussi précise et vivace qu'une	Relativement nette, presque aussi vivace	Moyennement nette et vivace	Vague et imprécise	Aucune image, vous "savez" seulement que
1. Marcher	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
2. Courir	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
3. Donner un coup de pied dans une pierre	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
4. Se pencher pour ramasser une pièce	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
5. Monter des escaliers en courant	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
6. Sauter sur le côté	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
7. Jeter une pierre dans l'eau	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
8. Lancer un ballon en l'air avec le pied	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
9. Dévaler une pente en courant	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
10. Faire du vélo	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
11. Se balancer sur une corde	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
12. Sauter du haut d'un mur	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5

ANNEXE 12 : QUESTIONNAIRE DE PRESENCE UTILISE DANS L 'ETUDE 3

- 1) J'étais capable de contrôler les événements
- 2) L'environnement était réactif (sensible) à mes actions
- 3) Mes interactions avec l'environnement me semblaient naturelles
- 4) Les aspects visuels de l'environnement m'invitaient à m'y impliquer
- 5) Les mécanismes permettant mon mouvement dans l'environnement me semblaient naturels
- 6) Mes sens étaient trompés par le réalisme du mouvement des objets à travers l'espace
- 7) Les expériences que j'ai vécu dans l'environnement virtuel ressemblaient à celles de l'environnement réel
- 8) J'étais capable d'anticiper les conséquences des mouvements que je faisais
- 9) J'étais en mesure d'explorer activement l'environnement de façon visuelle
- 10) La sensation de déplacement à l'intérieur de l'environnement virtuel était confondante (réaliste)
- 11) Je pouvais examiner les objets de près comme de loin
- 12) Je pouvais examiner les objets sous différents angles
- 13) J'étais impliqué(e) dans l'expérience vécue dans l'environnement virtuel
- 14) Je n'ai pas ressenti de délai séparant mes actions de leurs conséquences
- 15) Je me suis adapté(e) rapidement à l'expérience vécue dans l'environnement virtuel
- 16) En termes d'interactions et de déplacements dans l'environnement virtuel, je me sentais compétent(e)
- 17) La qualité visuelle de l'appareillage graphique ne m'a pas incommodé(e) dans l'exécution des tâches requises
- 18) Les mécanismes de contrôle de mon mouvement n'ont pas interféré avec l'exécution des tâches requises
- 19) Je suis parvenu(e) à me concentrer sur les tâches requises plutôt que sur les mécanismes utilisés pour effectuer lesdites tâches