



HAL
open science

Développement des représentations spatiales d'itinéraires virtuels : composantes cognitives et langagières

Marion Nys

► **To cite this version:**

Marion Nys. Développement des représentations spatiales d'itinéraires virtuels : composantes cognitives et langagières. Psychologie. Université Sorbonne Paris Cité, 2015. Français. NNT : 2015US-PCB084 . tel-01410035

HAL Id: tel-01410035

<https://theses.hal.science/tel-01410035>

Submitted on 6 Dec 2016

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.

THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE RENE DESCARTES PARIS 5

Ecole doctorale 261, Cognition, Comportements, Conduites humaines

Spécialité : Psychologie

DEVELOPPEMENT DES REPRESENTATIONS SPATIALES

D'ITINERAIRES VIRTUELS :

composantes cognitives et langagières

Marion Nys

Soutenance le 12 février 2015

DIRECTRICES DE THESE :

Maya Hickmann, DR-HDR, Université Paris 8, CNRS

Valérie Gyselinck, MC HDR, Université Paris Descartes, INSERM

COMPOSITION DU JURY :

Catherine Brandner, PR-HDR, Université de Lausanne (Rapporteur)

Yannick Courbois, PR-HDR, Université Lille 3 (Rapporteur)

Marie-Paule Daniel, MCU HDR, LIMSI-CNRS (Examinateur)

Laboratoire Mémoire et Cognition, INSERM S894

Laboratoire Structures Formelles du Langage, UMR7023





Peinture d'Edouard Weal

Quelques symboles de rêves aborigènes :



Point d'eau



Bâton



Personne



Femme avec son panier et son bâton



Emprunte

REMERCIEMENTS

En tout premier lieu, je souhaiterais remercier mes deux directrices de thèse, Maya Hickmann et Valérie Gyselinck. Vous avez su me guider au cours de ce long trajet. Merci à Maya de m'avoir fait découvrir et apprécier le vaste domaine de la linguistique. Merci pour ta patience et ta minutie. Merci Valérie pour ta présence, ton soutien, ton humour et ton dynamisme. Tu as su me rassurer et me questionner. Un grand merci à toutes les deux pour votre gentillesse et votre patience.

Merci à Catherine Brandner, Yannick Courbois et Marie-Paule Daniel, membres du jury, d'avoir pris le temps d'étudier ce manuscrit et d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je souhaite également remercier Eric Orriols et Franck Bourry pour avoir toujours été là, merci pour votre aide, pour nos discussions. Merci Eric de m'avoir permis de découvrir la réalité virtuelle. Merci Franck pour ta présence, et ta réactivité face aux difficultés techniques.

Merci également à Philippe Bonnet pour ton aide lors de nos discussions statistiques.

J'aimerais également remercier les directeurs des écoles, les instituteurs, les parents et tous les enfants qui ont rendu cette thèse possible. Merci pour la confiance qu'ils m'ont accordé. Merci notamment à mon oncle (tonton Christophe) qui m'a permis de faire mes premiers pas parmi ces collègues. Lucile, je suis ravie de t'y avoir rencontré et d'avoir pu construire une nouvelle amitié.

Je tiens également à remercier Doriane, Célia et Elise qui ont partagé ces longues heures passées au bureau. Vous m'avez supportée à tour de rôle, aidée et encouragée depuis les premiers moments de cette thèse. Merci aussi à tous les doctorants et post-doctorants Maria, Christelle, Laurie, Léo, Dominique et Marco pour ces pauses thés si agréables. Merci à tous pour votre sincérité.

Merci à mes collègues de Paris 8, Eva, Lang, Camille, et tous les autres pour m'avoir fait découvrir leurs domaines de recherche avec des méthodologies très différentes mais également pour avoir partagé l'organisation des journées des doctorants. Merci à Isabelle et Asaf pour la richesse des discussions lors de leurs séminaires.

Merci aux anciens doctorants Yannick, Laura, Jennifer et Xavier qui malgré leur départ, ne m'ont jamais oublié. Ils ont su être de très bon soutien. Je suis heureuse de vous avoir rencontré et d'avoir pu tisser ces amitiés.

Je tiens particulièrement à remercier mes amis : Danièle qui m'a soutenu, relu et aidé pendant de longues heures en cette dernière ligne droite. Merci pour ta joie, ta curiosité et ton énergie. Merci pour ton amitié. Karin tu es toujours là, pour les bons et moins bons moments. Merci de me faire découvrir si souvent de nouveaux horizons culturels. Merci également pour ton soutien constant. Je remercie également Nathalie, Laetitia et Marion, votre amitié m'est très précieuse. Merci pour les moments que nous avons partagés et que nous partagerons encore. Merci à Marie, mon amie d'enfance. Merci également à mes amis Luisa, Miguel, Karina, Chris, Martin, Jess et bien d'autres encore.

Enfin, je souhaite remercier ma famille notamment mes parents, mon frère et ma sœur. Ils m'ont appris à développer ma curiosité, mon esprit critique et ma persévérance. Merci aussi à mon beau-frère et ma belle-sœur, à tous mes oncles, tantes, cousins et cousines, toujours prêt pour partager un moment ensemble. Merci à ma grand-mère pour ses corrections. Merci à mon grand-père pour ces escapades dans Paris qui m'ont accordé des moments de détente bienvenues. Merci beaucoup pour tous ces moments de bonheurs que nous passons et d'être toujours là dans les périodes difficiles.

RESUME

Si de nombreux travaux ont été consacrés aux représentations spatiales chez le jeune adulte, la nature des modèles spatiaux, les processus qui président à leur construction et la façon dont ils se développent sont encore loin d'être compris. L'originalité de cette thèse tient au fait d'étudier conjointement les composantes cognitives et langagières dans l'acquisition des représentations d'itinéraires virtuels par des enfants (de 5 à 11 ans) et des adultes, ainsi que les différences individuelles liées à des capacités générales variées.

Dans une première partie, la thèse présente les principaux concepts de la cognition spatiale issus des travaux menés chez l'adulte ainsi que l'état des connaissances théoriques et empiriques actuelles sur le développement des représentations spatiales chez l'enfant. Un chapitre s'intéresse ensuite au rôle du langage dans la construction des représentations spatiales et un autre à celui de la mémoire de travail.

Afin de mieux comprendre le type de représentation qu'un enfant élabore au cours de son développement, une deuxième partie de la thèse présente trois expériences étudiant le développement des connaissances sur les repères et la route. Les deux premières études ont permis d'observer une augmentation qualitative et quantitative de la connaissance des repères, c'est-à-dire des entités spécifiques qui jalonnent un itinéraire, mais également de la connaissance de la succession de ces repères et des directions empruntées. Le rôle particulier des repères situés à un changement de direction est attesté chez l'adulte comme chez l'enfant. L'augmentation de ces connaissances avec l'âge est observée avec des tâches de production et de reconnaissance, aussi bien verbales que non-verbales. Ces résultats suggèrent l'existence d'une seule représentation commune ou de deux formats de représentations fortement reliés. Le lien important entre les informations verbales et non-verbales dans les représentations est attesté par l'observation d'un biais de type sémantique dans la reconnaissance visuelle de repères. Cependant, l'analyse des différences interindividuelles a mis en évidence le rôle de capacités visuo-spatiales telles que la perception des directions, mais pas d'influence des capacités langagières sur la capacité de représentation d'itinéraire. Une troisième étude explore le rôle des composantes verbales et visuo-spatiales de la mémoire de travail dans le développement des représentations spatiales au moyen d'un paradigme de double tâche (verbale ou spatiale) lors de la mémorisation d'itinéraires. L'implication, notamment de la composante spatiale de la mémoire de travail au cours de la mémorisation d'itinéraire, est mise en évidence chez l'enfant. Ce résultat renforce l'idée de la dominance d'une forme de codage visuo-spatial dans le développement de la représentation qui évoluerait au profit de codages plus verbaux ou mixtes.

En conclusion, cette thèse montre le développement de la capacité à se représenter un itinéraire au cours de l'enfance, attesté par des tâches de nature et de format variés. Si cette représentation semble impliquer à la fois des composantes verbales et non-verbales, ces dernières semblent être plus importantes chez l'enfant. La dernière partie de la thèse propose une discussion des implications de ces résultats pour le développement de la cognition spatiale chez l'enfant, ainsi que des perspectives pour les recherches futures.

Mots clefs : développement cognitif ; différences interindividuelles ; encodage verbal, encodage visuo-spatial, langage ; mémoire de travail ; réalité virtuelle, repères décisionnels ; représentation spatiale.

ABSTRACT

Although many studies have investigated spatial representation in young adults, little is still known about the processes underlying how they construct spatial models, the nature of these models, and how they develop in children. The originality of this thesis is two-fold: it studies both cognitive and linguistic processes involved in how children (5 to 11 years) and adults construct representation of virtual routes; it also examines individual differences in these processes.

The first part of this thesis begins with a chapter that presents the main concepts underlying spatial cognition, as well as some experimental evidence concerning adults' spatial knowledge and the development of this knowledge during childhood. A second chapter then focuses on the role of language and a third one on the role of working memory in the construction of spatial representations.

In order to understand how children construct spatial representation during development, a second part of the thesis presents three experiments investigating the development of landmark and route knowledge. The first two studies show developments in the quality and quantity of knowledge concerning both landmarks (i.e. specific entities encountered along the route) and the route (i.e. the sequential order of actions and landmarks). They also provide evidence supporting the specific role of landmarks associated with changes of direction ("decisional" landmarks) in children and adults. Developmental changes in spatial knowledge were assessed by both verbal and non-verbal measures, suggesting the existence of a unique representation or of two representations that are strongly related. The relation between verbal and non-verbal information in participants' representations is evidenced by their bias toward choosing a related landmark of the same semantic category, regardless of its visual characteristics. Nevertheless, analyses show that visuo-spatial abilities such as the perception of directions, but not verbal abilities, play a main role in accounting for individual differences. The third study, investigates verbal and visuo-spatial components of working memory, using a dual task paradigm in which participants performed a verbal or spatial interference task while memorizing routes. The results support the idea that representing itineraries mostly involves a spatial mode of encoding in children and a more verbal or mixed encoding in adults.

To conclude, this thesis shows a development in children's capacity to build spatial representations of virtual routes. Although their representation seems to integrate both verbal and non-verbal components, non-verbal abilities appear to be most essential for children. The last part of the thesis discusses the implications of our results for our understanding of the development of spatial cognition in children, as well as future perspectives and conclusions.

Keywords: cognitive development; individual differences; verbal encoding; visuo-spatial encoding; language; working memory; virtual reality; decisional landmarks; spatial representation.

SOMMAIRE

Introduction	13
PARTIE I	17
Chapitre 1. Les représentations spatiales	19
1. Définitions	19
1.1. Cognition, représentation et mémoire spatiale	19
1.2. Développement de la cognition spatiale chez l'enfant	22
2. La représentation spatiale d'itinéraires	29
2.1. Les sources d'informations propres à la navigation	30
2.2. Les différents systèmes de référence	30
2.3. Les différentes connaissances spatiales	31
2.4. De la connaissance des repères à la connaissance en survol	34
3. Spécificités des représentations spatiales et de leurs études	42
3.1. Les différences inter-individuelles	42
3.2. Les bases neurales	47
3.3. Utilisation de la réalité virtuelle pour l'étude des représentations d'itinéraires	49
Résumé : Les représentations spatiales	51
Chapitre 2 : Le langage dans les représentations d'itinéraires	53
1. Le discours spatial	54
1.1. Indications de repères, de mouvements et d'indices de configuration	54
1.2. Changement de point de vue/de référentiel	57
2. Interaction entre langage et cognition spatiale	59
2.1. Informations verbales et performances spatiales	59
2.2. Différences inter-langues	60
3. Le développement du langage spatial chez l'enfant	62
3.1. Organisation du discours spatial	63
3.2. Expression du mouvement	64
3.3. Expression des relations spatiales	65
4. Les descriptions verbales d'itinéraires	67
4.1. Transmission d'informations spatiales spécifiques	67
4.2. Description verbale et représentation mentale	70
4.3. Une description efficace	71
4.4. Exemples d'études chez l'enfant	74
Résumé : Le langage dans les représentations spatiales	77

Chapitre 3 : Mémoire de travail et représentations spatiales	79
1. Définition de la mémoire de travail	79
1.1. La mémoire de travail selon Baddeley	79
1.2. Evolution du modèle de Baddeley et quelques autres modèles de MDT	85
2. Développement de la mémoire de travail chez l'enfant	88
2.1. Le développement des capacités de mémoire chez l'enfant	88
2.2. Des hypothèses explicatives	89
3. Mémoire de travail et navigation	93
3.1. Etudes chez l'enfant	93
3.2. Rôle des différentes composantes de la mémoire de travail au cours de l'encodage et/ou de la restitution d'itinéraires	94
3.3. Différences inter-individuelles : Influence de la stratégie, des capacités de rotation mentale et du sens de l'orientation	98
Résumé : Mémoire de travail et représentation spatiale	101
PARTIE II : Etudes expérimentales	105
Chapitre 4 :	109
Expérience 1 _ Evaluer le développement de la représentation spatiale : variabilité des tâches verbales et visuo-spatiales	109
1. Introduction	109
2. Problématique	114
3. Méthode	115
3.1. Participants	115
3.2. Matériel	116
3.3. Procédure	122
4. Traitement des données	125
5. Hypothèses opérationnelles	128
6. Analyses statistiques	129
7. Résultats	130
7.1. Performances aux épreuves de l'itinéraire	130
7.2. Analyses de corrélations entre les tâches sur l'itinéraire	140
7.3. Analyses de corrélations entre les mesures de l'itinéraire et les mesures d'habiletés cognitives et linguistiques	142
8. Discussion-Conclusion	144

Chapitre 5 :	153
<i>Expérience 2_ Représentation spatiale : diversification des environnements et des tâches verbales et visuo-spatiales</i>	153
1. Introduction	153
2. Problématique	154
3. Méthode	155
3.1. Participants	155
3.2. Matériel	156
3.3. Procédure	158
4. Hypothèses opérationnelles	161
5. Résultats	162
5.1. Reconnaissance visuelle des repères :	162
5.2. Reconnaissance verbale/auditive des repères	164
5.3. Test de décision	165
5.4. Lien entre la représentation d'itinéraires et les habiletés cognitives	167
6. Discussion – Conclusion	167
Chapitre 6 :	171
<i>Expérience 3_ Rôle des composantes verbales et visuo-spatiales de la mémoire de travail</i>	171
1. Introduction	171
2. Problématique	174
3. Méthode	175
3.1. <i>Participants</i>	175
3.2. Matériel et procédure	176
4. Traitements des données	177
5. Hypothèses opérationnelles	178
6. Analyses statistiques	178
7. Résultats	179
7.1. Performances aux épreuves de représentation d'itinéraires	179
7.2. Analyse des corrélations entre les effets d'interférences observés sur les mesures de l'itinéraire et les mesures des habiletés cognitives et linguistiques	188
8. Discussion – Conclusion	189

<i>Partie III : Discussion et conclusion générale</i>	197
<i>Chapitre 7: Discussion</i>	201
1. Le développement des connaissances spatiales	201
1.1. Les résultats de nos études	201
1.2. Implications théoriques	204
2. Les dimensions verbales et visuo-spatiales des représentations spatiales	207
2.1. Dans les restitutions	207
2.2. Différences inter-individuelles : Habiletés verbales et visuo-spatiales	208
2.3. Rôle des composantes verbale et visuo-spatiale de la mémoire de travail lors de la mémorisation d'itinéraires	209
3. Limites méthodologiques	211
3.1. L'utilisation de la réalité virtuelle	211
3.2. Un apprentissage passif	211
3.3. Milieu urbain versus milieu rural	212
3.4. Mémoire de travail : capacité de maintien ou de manipulation	212
<i>Chapitre 8 : Conclusion générale</i>	215
<i>Bibliographie</i>	217
<i>Annexes</i>	245
1. Livret de passation (livret expérimentateur)	247
2. Matériel de réalité virtuelle	252
3. Tests complémentaires expérience 1	256
4. Analyses des productions verbales et cartographiques	269
5. Matériel des expériences 2 et 3	273
6. Analyses des descriptions	279

Introduction

Savoir naviguer est primordial et même vital pour tout être vivant. Cette capacité intervient quotidiennement pour assurer la survie de l'espèce, chez l'animal (trouver de la nourriture, échapper aux prédateurs) comme chez l'humain pour réaliser des déplacements dans des milieux urbains complexes ou des environnements naturels, familiers ou non (visite d'une ville, rendez-vous professionnels, randonnée en montagne). Naviguer sans se perdre implique de savoir où nous sommes et où se trouve notre objectif, et ainsi de retrouver son chemin dans toutes sortes d'environnements (capacité dite de « *wayfinding* » dans la littérature anglophone).

Nous sommes capables de naviguer à partir d'informations très variées y compris sans avoir jamais exploré préalablement l'environnement. En effet, nous pouvons naviguer et retrouver notre chemin aussi bien grâce à une perception directe de l'environnement que grâce à des représentations symboliques comme le langage ou les cartes. Des traces de ces représentations symboliques sont observées très précocement dans l'Histoire de l'humanité et dans toutes les cultures. Les aborigènes d'Australie, par exemple, représentent leur environnement sous forme de peintures (souvent nommées « rêves »). Ces représentations ont permis à certaines tribus de transmettre des informations sur des points d'eau ou d'alimentation ainsi que sur la topologie d'un espace qu'ils n'ont eux-mêmes jamais visité. La transmission de ce « rêve » d'un ancêtre a ainsi permis de retrouver avec exactitude un emplacement plusieurs générations après sa première mention. Ces représentations symboliques permettent à l'Homme de se construire une représentation mentale de l'environnement. Une fois qu'un individu a construit et mémorisé une représentation mentale, il peut l'utiliser de différentes manières pour naviguer dans l'environnement et pour expliquer à quelqu'un, qui n'en a aucune connaissance, quel itinéraire suivre entre un point et un autre. Le mode de transmission peut, ici aussi, être de nature graphique, gestuelle ou verbale. Il existe donc une grande variabilité dans les sources des informations et des représentations spatiales, ainsi que dans leur utilisation dans des contextes particuliers. Il apparaît donc que l'homme est capable d'acquérir et de restituer des informations

spatiales à partir de sources très variées, soulevant nombre de questions dans les recherches en cognition spatiale. Par exemple, ces formes d'informations conduisent-elles les individus à se former des représentations équivalentes ? Ces représentations sont-elles aussi efficaces lors de la navigation ?

Par ailleurs, une grande variabilité interindividuelle est observée chez l'être humain aussi bien au cours de son développement (rythme et parcours au cours de l'évolution des capacités sous-jacentes) qu'au sein d'un groupe homogène d'individus (par exemple de même âge et de même origine géographique ou socio-économique). Elle peut concerner différentes capacités qui permettent par exemple de se représenter un espace, de le manipuler, de le mémoriser ou de le transmettre. D'autres questions concernent donc cette variabilité et notamment l'acquisition des connaissances et des compétences nécessaires à l'élaboration des représentations spatiales chez l'enfant et chez l'adulte. Comme nous verrons au cours de la thèse, le développement de certaines capacités – langagières et visuo-spatiales, ainsi que spécifiques à l'espace ou plus générales – est indispensable pour que les représentations spatiales de l'enfant deviennent de plus en plus efficaces. Si certaines capacités semblent être très précoces, elles continuent de se développer et d'autres émergent à différents moments, tout au long de notre enfance et adolescence. Malgré l'existence d'études qui se sont intéressées à ces développements, le poids relatif de différents types de capacités et la nature précise de leurs interrelations n'ont pas encore été élucidés.

L'objectif de cette thèse est d'étudier le développement des représentations spatiales d'itinéraires virtuels. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux composantes cognitives visuo-spatiales et langagières utilisées au cours de l'apprentissage et de la restitution des itinéraires. Nous nous centrons sur la présentation visuelle d'itinéraires, tout en incluant des mesures aussi bien verbales que visuo-spatiales des connaissances intervenant dans les représentations.

La thèse est organisée en trois parties : une première partie comprenant trois chapitres théoriques, suivi d'une deuxième partie présentant trois études et enfin d'une troisième partie proposant une discussion générale et des conclusions.

Partie 1. Le premier chapitre propose de définir des concepts généraux concernant les représentations spatiales et d'explicitier les différentes étapes mises en œuvre dans la construction de représentations d'itinéraires au cours du développement de l'enfance à l'âge adulte, et ceci en tenant compte des variabilités interindividuelles.

Dans le deuxième chapitre, nous nous interrogeons sur les interactions entre le langage et les représentations spatiales. Nous précisons ce qui est actuellement connu concernant les spécificités du langage spatial et de son développement, notamment à partir de descriptions d'itinéraires.

Le troisième chapitre aborde le rôle de la mémoire de travail dans le développement des représentations spatiales. Après avoir défini le concept de mémoire de travail, et indiqué les connaissances actuelles concernant son développement, nous rapportons les résultats des études s'étant intéressées au rôle des composantes verbales et visuo-spatiales de la mémoire de travail lors de la mémorisation d'itinéraires virtuels, observés principalement chez l'adulte.

Partie 2. Suite à cette revue de questions, trois études expérimentales sont présentées. Toutes trois étudient la représentation d'un itinéraire virtuel chez des enfants et des adultes. La qualité de cette représentation est évaluée à l'aide de différentes mesures verbales et visuo-spatiales, et les performances observées sont mises en lien avec les compétences d'attention, de mémoire de travail, de perception des directions, ainsi que de production et de compréhension langagière, permettant de tenir compte des différences individuelles. La première étude s'intéresse à l'élaboration d'une représentation d'un itinéraire virtuel par des enfants de 5 à 11 ans et par des adultes, en explorant plus particulièrement le rôle des compétences langagières. La deuxième étude précise le rôle de la position des repères sur leur mémorisation ainsi que l'influence de leur dénomination. La troisième et dernière étude s'intéresse au rôle des composantes verbales et visuo-spatiales de la mémoire de travail au cours de la mémorisation d'itinéraires virtuels.

Partie 3. La dernière partie propose deux chapitres. Le premier chapitre synthétise et discute les résultats de ces études en les considérant à la lumière des connaissances et développements théoriques actuels. La question du développement des connaissances des repères et des connaissances de type route est d'abord discutée. Nous nous intéressons particulièrement à la comparaison des différents formats d'évaluation des connaissances. Un deuxième point concerne le rôle des composantes verbales et visuo-spatiale de la représentation d'itinéraire, abordant alors les différences observées entre les mesures verbales et visuo-spatiales puis le rôle des composantes verbales et visuo-spatiales de la mémoire de travail lors de la mémorisation d'itinéraires par des enfants et des adultes. Un troisième et dernier point concerne les limites de nos études et les perspectives des recherches futures. Enfin, le dernier chapitre propose une conclusion générale de la thèse.

PARTIE I

Chapitre 1. Les représentations spatiales

1. Définitions

1.1. Cognition, représentation et mémoire spatiale

1.1.1. *La cognition spatiale*

Cette thèse s'inscrit dans le champ d'étude de la **cognition spatiale**. Le terme de cognition provient du latin *cognito* « action d'apprendre à connaître ».

La cognition inclut des processus divers comme la perception, l'apprentissage, la pensée, le raisonnement, la mémorisation, le rappel, la résolution de problèmes et le langage (Golledge, 2004). La cognition spatiale correspond aux capacités centrées sur les informations, connaissances et actions liées à l'espace.

La cognition spatiale désigne plus précisément les facultés mentales impliquées dans la capacité à percevoir les informations spatiales nécessaires pour se représenter un espace, manipuler ces informations spatiales et utiliser des concepts relatifs à cette notion (Denis, 2012). Elle fait référence au sous-ensemble des connaissances d'un environnement spatial immédiat ou lointain pour un individu donné (Denis, 1997) et joue un rôle dans la navigation ainsi que l'utilisation de représentations symboliques comme les cartes (Landau, 2002). De plus, elle intervient lorsqu'il s'agit de localiser des entités dans l'espace, par exemple lorsque nous cherchons nos clés, que nous allons au travail, ou que nous construisons un meuble. Elle intervient également de façon plus spécialisée pour des domaines d'expertises professionnels divers, comme la géographie, l'astronomie, la géologie, l'architecture ou l'ingénierie (Vasilyeva & Lourenco, 2012).

1.1.2. *La représentation spatiale*

La cognition spatiale met en jeu des processus internes allant du concept précurseur de « Carte cognitive » proposé par Tolman (1948), aux modèles mentaux de Johnson-Laird (1983) jusqu'aux concepts actuels de cartes mentales ou plus généralement de représentations spatiales.

Au 19^{ème}, Tolman (1948) introduit le concept de **carte cognitive** (« cognitive map »), qui correspond à la représentation interne qu'un organisme se fait de l'organisation de l'espace dans lequel il se trouve et/ou se déplace. En effet, il infère qu'un apprentissage moteur comme l'apprentissage de labyrinthes par des rats met en jeu des mécanismes autres que l'acquisition simple d'enchaînements d'actions et de procédures. Les cartes cognitives ont souvent été étudiées chez l'animal. Dans les années 1980, Richard Morris démontre que les rongeurs sont capables de trouver rapidement une plateforme non visible dans une piscine (qui deviendra la « piscine de Morris »), et ceci quelle que soit leur position de départ. Les rongeurs sont donc capables de construire une représentation mentale de l'environnement. De nombreuses études en éthologie ont également montré d'impressionnantes capacités de navigation ou de mémoire spatiale chez des espèces variées (Campbell & Reece, 2011 pour une revue). Par exemple, les oiseaux migrateurs sont capables de parcourir des itinéraires de milliers de kilomètres et les mésanges sont capables de retrouver des dizaines de réserves de nourriture cachées.

La cognition spatiale est souvent étudiée dans le cadre de la théorie des **modèles mentaux** de Johnson-Laird (1983). Ce concept fait suite à de nombreux précurseurs, comme les théories de Pierce au 19^{ème} siècle ou de Craik au 20^{ème} siècle (Johnson-Laird, 2004, pour une revue). Il a été principalement développé sur la base de l'étude de la compréhension de texte ou de discours et du raisonnement (notamment hypothético-déductif). Un modèle mental peut être construit à partir de la perception, de l'imagination ou de l'écoute d'un discours. C'est une représentation analogique, constituée de concepts spécifiques appelés « tokens » (exemple de token: « l'ancien monarque » et « le vieux roi »). Les différents tokens entretiennent des relations spatiales, temporelles ou causales, formant ainsi un modèle isomorphe au monde qui permet de résoudre un problème en simulant une activité. Il n'existe pas un modèle mental unique d'un concept, mais différentes versions selon leur usage ou leur signification dans différents contextes et pour différents locuteurs, en fonction de leurs connaissances générales et spécifiques.

Les **cartes mentales** permettent à l'individu de se représenter mentalement le monde qui l'entoure et ainsi de connaître à tout moment quelle est sa position et quel chemin prendre pour atteindre son but, où se situent les objets qui l'entourent même s'ils ne sont pas visibles, comment s'orienter et s'adapter aux modifications d'un environnement, mais également comment communiquer aux autres ses connaissances spatiales (Denis & Cocude, 1992 ; Denis, 1996). L'individu est donc capable d'effectuer des inférences, concernant par exemple les

relations entre les éléments et les distances. En se créant des cartes cognitives (« cognitive mapping »), l'individu réalise un processus dynamique impliquant l'acquisition, le maintien, la manipulation interne et l'utilisation d'informations sur l'environnement externe (Golledge, 2004). Une carte cognitive ne représente pas l'environnement réel mais bien la perception qu'un individu s'en fait. C'est une représentation interne, subjective et personnelle du monde. Elle est dépendante de l'individu et des informations spatiales qu'il a perçues lors de ses déplacements ou de celles qu'on lui a fournies. Les cartes cognitives sont donc incomplètes, partitionnées et non uniformes quant à leur précision concernant l'espace représenté (Golledge & Hubert, 1982). Malgré la subjectivité d'une représentation, elle conserve certaines caractéristiques structurelles de la représentation réelle. Par exemple, les distances entre deux éléments sont conservées. Ainsi, lorsqu'un participant se représente mentalement un environnement, la durée pour scanner mentalement la distance entre deux points de l'environnement est proportionnelle à la distance réelle entre ces repères (pour une revue, Denis & Kosslyn, 1999). Les informations contenues dans ces représentations peuvent être qualitatives ou quantitatives (Golledge, 1990).

Une **représentation spatiale** est donc une construction ou une image mentale dynamique (c'est-à-dire non-figée) d'informations spatiales. Elle soutient les capacités de perception, d'action et de penser l'espace (Landau, 2002). En l'absence de stimulations perceptives, cette représentation mentale conserve les caractéristiques de l'espace préalablement perçues par l'individu, mais peut aussi être manipulée. C'est une construction dynamique qui peut être adaptée selon les nouvelles informations acquises par l'expérience, c'est à dire en fonction de l'état des connaissances du sujet. Cette représentation dynamique peut donc être considérée comme un modèle mental spatial et non comme une simple image.

1.1.3. La mémoire spatiale

La construction d'une carte mentale s'appuie sur la mise en mémoire d'informations relatives à l'organisation spatiale de l'environnement. La **mémoire spatiale** est l'habileté à encoder, stocker et retrouver des informations spatiales (Kessels, de Haan, Kappelle & Postma, 2001).

Lorsqu'il est question de la perception des grands espaces, elle peut également être appelée « mémoire topographique ». Cette mémoire des informations spatiales permet la

réention d'informations verbales et non-verbales concernant l'espace. Ce n'est donc pas une mémoire unitaire. Elle fait appel à plusieurs types de mémoire du modèle de Tulving (1995) :

- la mémoire sémantique, c'est-à-dire au système mnésique par lequel l'individu stocke ses connaissances générales,
- à la mémoire épisodique (rétrospective et prospective), c'est-à-dire la mémoire des événements vécus personnellement, situés dans un contexte spatio-temporel et dont la restitution est associée à un sentiment de reviviscence,
- à la mémoire procédurale.

La mémoire spatiale fait référence à des types d'informations variées et nous permet de localiser des objets ou de trouver un lieu, mais également d'adapter notre comportement en fonction des contraintes de l'environnement passées, présentes et futures. Les informations traitées pouvant être des images ou des mots activant facilement l'imagerie, elles pourront alors être mémorisées sous plusieurs formes. En effet, selon Paivio (1971, 1986, 2014) un double codage, verbal et visuel, serait réalisé pour des informations concrètes et l'utilisation de ces deux systèmes de codage faciliterait la mémorisation.

1.2. Développement de la cognition spatiale chez l'enfant

Les recherches antérieures sur la cognition spatiale chez l'enfant ont porté sur différentes périodes du développement. Certains travaux montrent que dès le plus jeune âge (deux-trois mois après la naissance), le nourrisson fait preuve de capacités étonnantes dans ce domaine, nous en discuterons ultérieurement (Vasilyeva & Lourenco, 2012 pour revue). La présence de ces capacités très précoces est interprétée par certains auteurs comme relevant d'une base innée et universelle dit « noyau de connaissances » (Spelke, 1998). En revanche, d'autres recherches montrent des développements plus graduels pouvant suivre des séquences développementales jusqu'à un âge relativement tardif. Ces développements graduels font intervenir l'acquisition de nouvelles connaissances de telle sorte que certaines capacités de représentation spatiale seraient acquises avec l'expérience et à travers l'interaction de l'enfant avec son environnement. Comme nous le verrons ci-dessous, il existe ainsi de nombreux débats sur le développement de la cognition spatiale, qu'il est utile de considérer pour rendre compte des travaux conduits dans ce domaine.

1.2.1. *Le développement des capacités spatiales selon Piaget*

Au cours du vingtième siècle, l'étude du développement des capacités cognitives a été fortement influencée par la théorie développementale de Jean Piaget (1896-1980). Selon cette théorie le développement cognitif serait jalonné de plusieurs **stades généraux** qui seraient sous-jacents à l'évolution de tous les domaines de connaissance dans l'ontogenèse de la cognition humaine (Piaget 1972 ; 1977) : le stade sensori-moteur (avant 2 ans) ; la pensée « préopératoire », qui implique une perspective égocentrée (entre environ 2 ans et 7 ans) ; la pensée « opératoire concrète », qui permet à l'enfant de dépasser la perspective égocentrée pour prendre en compte l'existence d'autres points de vue (vers environ 7-8 ans), puis de comprendre la notion de la relativité des perspectives (à partir d'environ 8-9 ans) ; et enfin la pensée « opératoire formelle » (vers environ 11-12 ans) permettant à l'enfant de développer des concepts indépendants de tout point de vue et de raisonner de façon abstraite.

Selon Piaget, le nourrisson ne possède pas de réelle représentation de l'espace avant l'âge d'un an (Piaget, 1937). Par exemple, avant cet âge, il n'a pas encore acquis la permanence de l'objet, ni la coordination de différents éléments dans l'espace. Il associe un objet à un contexte, mais ne conçoit pas encore que l'objet ait une existence en soi indépendante de ses propriétés spatio-temporelles, conférant à l'objet sa « permanence » quelle que soit sa situation à un moment donné. Ce n'est qu'après un an que l'enfant devient capable de chercher un objet et de concevoir qu'il existe même s'il n'est pas à la place attendue, par exemple après son déplacement d'une localisation à une autre, comme le montrent des expériences sur la recherche d'objets.

Au cours du développement sensori-moteur (de 0 à environ 2 ans), l'enfant acquiert la notion de permanence de l'objet, l'organisation spatio-temporelle (marquée par les groupes de déplacement) et la causalité. Les représentations de l'enfant s'inscrivent alors dans un espace « pratique » guidé par les actions qu'il effectue lors de ses interactions avec son environnement. Progressivement, ses capacités logiques évoluent en se basant sur des **groupes de déplacements** (Piaget, 1937) qui impliquent quatre propriétés de transformation : la composition, les déplacements inverses, la réversibilité et l'associativité. La *composition* renvoie au fait qu'un déplacement de A vers B puis de B vers C peut être résumé par un déplacement de A vers C ($AB+BC=AC$). Les *déplacements* directs/inverses correspondent au fait qu'aller de A vers B équivaut à aller de B vers A ($AB=BA$). La *réversibilité* signifie aller de A vers B, puis de B vers A, ce qui revient à retourner au point de départ donc d'aller de A à A ($AB+BA=AA$). Enfin,

l'*associativité* correspond au fait qu'il y ait plusieurs chemins possibles pour arriver au même endroit ($ABD=ACD$). Cette dernière propriété permet d'acquérir la notion de détours et de raccourcis. Au cours de cette même période de développement sensori-moteur, l'enfant serait amené à acquérir la notion de causalité. Il ne se situerait plus uniquement du point de vue de son action directe mais deviendrait capable de prendre en compte des relations de cause à effet comme « tirer sur un tapis pour récupérer un objet hors de portée ».

Enfin, l'acquisition de cet espace de déplacement permettrait le développement d'un **espace de représentation** (Piaget, 1975), impliquant que l'enfant maîtrise trois types de représentations : les relations topologiques, l'espace projectif et l'espace euclidien.

Afin d'évaluer les étapes d'acquisition de ces représentations spatiales chez l'enfant, Piaget et Inhelder (1948) ont créé un paradigme expérimental qui a été adapté par la suite par d'autres chercheurs (par exemple Borke, 1975). Ce paradigme, appelé « l'expérience des trois montagnes » permet l'étude des connaissances des positions relatives des objets les uns par rapport aux autres selon l'emplacement des observateurs. Une maquette comprenant trois montagnes est présentée aux enfants : une grande montagne grise avec un sommet enneigé, une montagne moyenne brune surmontée d'une croix et enfin une petite montagne verte avec une maison. Dix images (2D) représentant ces mêmes montagnes vues selon diverses perspectives sont alors présentées aux enfants qui doivent choisir l'image représentant leur vue de cet environnement. Ils devront également montrer l'image représentant la vue qu'a une poupée placée d'un côté de la plateforme, de façon à avoir une autre perspective sur le même objet. Une autre technique consiste à demander de placer la poupée à l'endroit où elle aurait la même vue que celle représentée sur une image. À partir des observations réalisées avec ce type de paradigme expérimental, Piaget et Inhelder (1948) proposent les étapes suivantes du développement des relations spatiales. La connaissance des **relations topologiques** serait d'abord acquise au stade de la **perspective égocentrée**. Cette connaissance consiste à savoir positionner un objet par rapport à un autre, selon un point de vue particulier (notamment celui de l'enfant). Selon Piaget, il existe six types de relations topologiques : (1) Les relations de *localisation* indiquant la position telles que DEVANT *ou*, A GAUCHE. (2) Les relations de *voisinage* indiquant la proximité (par exemple, LOIN, A COTE, PRES DE). (3) Les relations d'*enveloppement* indiquant l'inclusion ou non d'un objet par rapport à un autre (par exemple, DANS, AU MILIEU, A L'EXTERIEUR). (4) Les relations de *continuité*, indiquant les limites (par exemple, A LA FRONTIERE, AU BORD). (5) Les relations de *succession*, indiquant un ordre (comme AU DEBUT, AU BOUT). (6) Enfin, les relations de *séparation* indiquant une distinction (comme SEPARE, ECARTE, EN DEHORS). Selon Piaget, l'acquisition des relations topologiques

se ferait graduellement jusqu'à environ 7-8 ans, c'est-à-dire au cours des stades sensori-moteur et préopérateur. Selon Piaget, cette acquisition correspond au premier stade du développement des connaissances spatiales, elle est égocentrée car on constate une indifférenciation chez l'enfant entre son propre point de vue et celui d'autrui.

Lors d'une deuxième étape de la **construction des représentations spatiales**, l'enfant prendrait graduellement conscience qu'il existe d'autres points de vue que le sien, comprenant ainsi qu'il est possible d'envisager que d'autres personnes ne voient pas la même chose que lui dans le même contexte. Néanmoins, même si l'enfant comprend qu'il existe plusieurs points de vue, il resterait encore principalement centré sur son propre point de vue avant de pouvoir adopter ces autres points de vue. Il est capable de modifier sa représentation mais n'arrive pas encore à vraiment imaginer un autre point de vue sauf comme une sorte de déformation de son point de vue.

Au cours d'une troisième étape, lors du stade opératoire (entre environ 7-8 et 11-12 ans), l'enfant prendrait conscience de la **relativité des perspectives**. Il se baserait sur ses connaissances topographiques pour comprendre les relations entre les éléments d'une configuration spatiale et les modifications que ceux-ci peuvent subir suivant différents points de vue. Cette évolution correspond au développement de l'**espace projectif**. Une fois acquise, la connaissance des positions relatives des éléments dans l'environnement en fonction de différents points de vue, il devient alors possible pour l'enfant d'adopter des points de vue différents du sien. Après la pensée égocentrée, l'enfant serait capable de pensée allocentrique, en commençant par faire une partie des changements adaptés à différents points de vue (*devant* devient *derrière* par exemple), tout en rencontrant encore dans un premier temps des difficultés à réaliser l'ensemble des changements (par exemple : *devant* devient *derrière* mais à *gauche* reste à *gauche* ou inversement). Il aurait ainsi acquis une « relativité vraie mais incomplète ». Ce n'est qu'après un certain temps que l'enfant arriverait à réaliser l'ensemble des changements nécessaires, montrant ainsi qu'il a une image mentale correcte de l'environnement incluant des points de vue qui sont différents du sien. Il est alors question de « relativité complète des perspectives ».

Enfin, il devient possible pour l'enfant d'acquérir la connaissance de l'**espace Euclidien**. On parle d'espace Euclidien pour désigner un espace de coordonnées. L'individu est capable de se représenter l'environnement suivant les coordonnées des différents éléments qui le composent. Cela implique de savoir estimer correctement les caractéristiques de l'espace ou d'objets contenus dans l'espace (les distances, les dimensions etc.). L'espace Euclidien correspond à la

connaissance globale d'un environnement indépendante du point de vue de l'individu. Cette acquisition se produit lors du stade des opérations formelles. Elle n'est cependant pas acquise par tous puisque certains adultes n'atteignent jamais ce stade de connaissance.

1.2.2 Les limites de ce modèle

Le modèle dominant de Piaget a été remis en cause par de nombreuses études s'inscrivant dans d'autres théories (ex. van Geert, 1998 ; Juhel, 1991 ; Siegler, 2000 ; Clifton, 2001 ; Lecuyer, 2001). Nous résumons brièvement ci-après quelques points critiques, concernant (1) la sous-estimation des capacités cognitives et notamment l'existence de capacités très précoces, (2) l'ordre d'acquisition de différentes capacités et (3) l'existence même de stades de développement.

(1) Tout d'abord, les capacités des bébés, évaluées par Piaget sur le plan comportemental, seraient très réduites. Or, il a été montré que les bébés possèdent des capacités cognitives bien supérieures à celles estimées par Piaget, indiquant l'existence de connaissances très précoces, contrairement aux prédictions de sa théorie par exemple en matière de comptage, d'espace, de causalité, de temporalité, de logique (Baillargeon, Spelke & Wasserman, 1985 ; Wynn, 1992 ; Spelke, 2000). Ces capacités complexes précoces ont amené certains chercheurs à supposer l'existence d'un « noyau de connaissances » qui serait inné dans l'espèce humaine malgré des développements ultérieurs au cours de l'enfance (voir par exemple, Spelke, 1998). Par exemple, contrairement aux conclusions de Piaget, certains travaux montreraient que les bébés auraient un concept de la permanence de l'objet dès 2-3 mois (Baillargeon, 1987 ; Baillargeon & DeVos, 1991). Des capacités de mémoire ont été également observées précocement au travers de paradigmes d'habituation ou de conditionnement. Ainsi, des résultats obtenus avec une tâche d'habituation montrent que des nourrissons de six mois sont capables de mémoriser la position d'un objet puis de trois objets à huit-neuf mois (Oakes, Hurley, Ross-Sheehy & Luck, 2011 ; Richmond, Zao & Burns, 2015).

À 18 mois, les jeunes enfants semblent même capables de retrouver des objets cachés lorsqu'un délai de 10 secondes intervient entre la présentation et la réponse, ce qui reflèterait selon Haden et al. (2011) des capacités de mémoire de travail. Ils sont aussi capables de reproduire des séquences d'actions à court terme et à plus long terme (après un intervalle de 2-3 semaines); la quantité (mémorisation des emplacements de 2 éléments à 18 mois et de 4 à 30

mois) et la complexité des séquences d'informations traitées augmentant avec l'âge. Bauer et Lukowski (2010) ont également montré dès 20 mois des capacités de mémorisation à long terme (testées après un délai d'un mois) de séquences d'actions apprises par imitation).

(2) L'ordre d'acquisition des différentes capacités proposé par Piaget et Inhelder (1948) est discuté par de nombreuses études soutenant ou contredisant leur hypothèse. Prenons l'exemple de la proposition de l'évolution de point de vue, passant d'un point de vue purement égocentrique (jusqu'à 7 ans) vers un point de vue allocentrique. De nombreuses études ont observé l'utilisation de différents points de vue et des relations entre les éléments bien avant 7 ans. Chez les jeunes enfants, un test fréquemment proposé est une adaptation du test de la piscine de Morris ou du labyrinthe d'eau (Morris, 1984), dans lequel les jeunes enfants doivent retrouver une plateforme ou un élément caché dans une salle en s'aidant ou non d'indices visuels. Dans une expérience de Ribordy, Jabès, Banta Lavenex et Lavenex (2013), des enfants de 18 mois à 5 ans devaient retrouver des éléments cachés dans un espace hexagonal (type labyrinthe de Morris), soit à l'aide d'indices locaux (proches du lieu de recherche) soit d'indices distaux (éloigné du lieu de recherche). Dès 2 ans, des enfants sont capables d'utiliser des indices distaux lorsque les éléments à trouver sont peu nombreux (un objet parmi quatre) puis vers trois ans dans des situations plus complexes (trois éléments parmi dix-huit). Il y aurait donc des capacités rudimentaires très précoces de l'utilisation de stratégies considérées comme allocentriques. Par exemple, Lehnung et al. (1998) ont demandé à des enfants de 5, 7 et 10 ans de retrouver des cachettes dans un labyrinthe de Kiev (proche du labyrinthe d'eau). L'environnement comprenait quatre indices distaux et quatre 4 indices proximaux. Les enfants devaient trouver les emplacements des cachettes puis les retrouver dans différentes conditions successives ; soit après avoir été désorientés (et changés de position) ; soit après être retournés à l'emplacement initial mais avec un changement de l'emplacement des repères proximaux ; soit en l'absence de ces repères proximaux ; soit après avoir été désorientés et changés de position et en l'absence des repères proximaux. Les chercheurs ont observé une utilisation des repères proximaux à 5 ans, alors qu'à 10 ans, les enfants sont capables de n'utiliser que les repères distaux, même après désorientation. Sept ans serait un âge de transition : la moitié des enfants utilisent une stratégie basée sur les repères proximaux, l'autre sur les repères distaux.

Plus récemment, Bullens *et al.* (2010a) ont proposé un test du type du labyrinthe d'eau à des enfants de 5 et 7 ans et des adultes afin d'évaluer le rôle des repères et des frontières dans le développement de la mémoire spatiale. Les participants devaient mémoriser l'emplacement

d'objets cachés dans un environnement circulaire (piscine sans eau) contenant un repère intra-labyrinthe amovible et surmonté d'indices distaux hors labyrinthe. Les enfants présentent des performances moins précises que les adultes. Alors que les adultes s'appuient principalement sur des indices stables extra-labyrinthe et sur les limites de la piscine, les enfants s'appuient autant sur les repères intra- et extra-labyrinthe que sur les frontières. Les résultats permettent de conclure que même à 5 ans les enfants sont capables d'utiliser des informations de configuration (comme les limites), des repères intra-labyrinthe (à l'intérieur du labyrinthe) et des indices distaux (hors du labyrinthe). Le poids de l'utilisation des différentes informations change au cours du développement.

Dans d'autres études les enfants devaient également retrouver des éléments mais après changements de point de vue. Par exemple, Nardini, Burgess, Breckenridge et Atkinson (2006) ont demandé à des enfants de 3 à 6 ans de retrouver des jouets cachés dans des boîtes identiques posées sur une plaque carrée sur laquelle se trouvaient également quelques repères et ceci dans quatre conditions : entre la présentation et la reconnaissance, soit il n'y avait pas de changement, soit seul l'enfant changeait de côté (positionné en diagonale), soit seule la plateforme bougeait soit l'enfant et la plateforme bougeaient tous les deux. Les enfants arrivent à retrouver les jouets lorsqu'il n'y a pas de changement ou lorsqu'eux-mêmes se déplacent (sans mouvement de la plateforme). Cependant, alors que les enfants de 5 et 6 ans arrivent aussi souvent à retrouver les jouets dans les deux autres conditions (mouvement de la plateforme seule ou avec un mouvement différent de l'enfant), les enfants de 3 et 4 ans n'y parviennent pas (performance en dessous ou juste au-dessus du hasard). Nardini et collaborateurs (2006) notent également de meilleures performances lorsque l'enfant ne bouge pas que lorsqu'il bouge, car dans le deuxième type de situation, il est obligé de changer de point de vue, ce qui le perturbe. Il utiliserait donc préférentiellement une stratégie égocentrique même s'il est capable de prendre en compte un autre point de vue. Ces chercheurs observent également de meilleures performances chez tous les enfants lorsque la plaque ne bouge pas. Dès trois ans, les enfants pourraient utiliser différents points de vue et non uniquement une stratégie purement égocentrique. Les enfants de 5 ans, quant à eux, seraient capables de reconnaître les emplacements indépendamment de leur point de vue.

Les résultats précédemment présentés montrent donc une apparition des capacités complexes bien plus précocement que ne l'avait estimé Piaget tel que la permanence de l'objet.

De plus, certaines études mettent en évidence des capacités de décentration que ce soit par l'utilisation de points de vue différents ou d'indices externes précoces remettant en cause l'idée de développement par étapes allant des connaissances égocentrées vers des connaissances allocentrées.

(3) La théorie de Piaget, qui conçoit le développement comme une succession de stades, impliquant des capacités fondamentalement et qualitativement différentes, a été remise en cause par différents auteurs. En particulier, certains conçoivent le développement comme non linéaire et composé « de vagues qui se chevauchent » (Siegler, 2000) ou encore comme un ensemble de transitions, de fluctuations et de régressions émanant d'un système dynamique propre au parcours de chaque individu (van Geert, 1998 ; Juhel, 1991). Notons que les différences inter-individuelles sont au centre de ce type d'approche, ainsi que les différences intra-individuelles de comportement d'un contexte à un autre. Dans cette perspective, différentes stratégies pourraient être utilisées en même temps par un même individu et/ou des stratégies de différents niveaux de complexité pourraient être utilisées à différents moments du développement selon les individus.

En conclusion, bien que le modèle de Piaget ait permis de nombreuses avancées, il a été remis en cause par des travaux plus récents et de nombreux autres modèles sont actuellement proposés et débattus. Il existerait ainsi des **capacités très précoces** de mémorisation, d'utilisation et de manipulation d'informations spatiales complexes. Ces capacités continuent toutefois de se **développer progressivement** jusqu'à l'âge adulte.

2. La représentation spatiale d'itinéraires

Parmi les différentes composantes de la cognition spatiale figure la représentation de grands espaces. Dans cette section, nous nous centrons sur ce type de représentation, qui permet notamment la navigation, définie comme une action orientée vers un objectif nécessitant de connaître sa position et sa destination. L'étude des représentations spatiales conduit à considérer différentes catégories d'informations spatiales, mais aussi des cadres de référence ou perspectives adoptées sur un espace. Une attention particulière sera portée à la description des

différentes connaissances spatiales pouvant être intégrées dans la représentation et dont les relations ainsi que le développement font l'objet de débats.

2.1. Les sources d'informations propres à la navigation

Lors d'une navigation, un ensemble d'informations sensorielles et motrices sont perçues. Ces informations peuvent être réparties en deux catégories : les informations allothétiques et les informations idiothétiques (Brandner, 2009).

Les informations allothétiques (ou extéroceptives) correspondent à l'ensemble des informations provenant de l'environnement extérieur. Elles peuvent donc correspondre à un stimulus visuel, olfactif, sonore ou tactile. Elles comprennent les informations qui nous sont transmises (par exemple, lors d'une description préalable, dans des panneaux indicateurs, à partir de repères) et elles permettent à un individu d'identifier un objet et son emplacement.

Les informations idiothétiques, quant à elles, proviennent de l'individu lui-même ou plus particulièrement de son organisme et de sa position, c'est-à-dire de son système vestibulaire, proprioceptif ou moteur. Ces informations sont donc modifiées dès que l'individu change de position. Elles lui permettent de connaître sa position et son orientation mais également la direction du point de départ de l'itinéraire qu'il réalise grâce à l'intégration des distances parcourues et des mouvements de rotation (selon un angle particulier). La capacité d'intégrer ces informations concernant les distances et l'orientation grâce aux mouvements de son corps correspond à l'intégration du chemin (« *path integration* » ou « *dead reckoning* » dans la littérature anglophone). C'est ce que nous utilisons notamment lors de la navigation en l'absence de repère ou de lumière. En présence d'informations allothétiques (extérieures), les informations idiothétiques permettent principalement de maintenir la bonne direction.

2.2. Les différents systèmes de référence

Une représentation de l'espace peut utiliser plusieurs systèmes de référence selon le point de vue utilisé : point de vue centré sur soi (égocentrique) ; ou centré sur les objets (exocentrique) ; ou encore centré sur l'environnement (allocentrique ou géocentrique) (Landau, 2002).

Les points de vue égocentrique et allocentrique fonctionneraient en parallèle tout en interagissant, le point de vue égocentrique primant souvent sur le point de vue allocentrique (Burgess, Spiers & Paleologou, 2004 ; Burgess, 2006 ; Banta Lavenex et al., 2011). Notons que le premier point de vue connu d'un environnement influence la connaissance de la configuration de cet environnement selon un second point de vue qui pourra quant à lui permettre une réorganisation de la connaissance initiale (Kelly & McNamara, 2010).

Un système de référence égocentrique est centré sur l'individu (tête, tronc, bras, ou rétine). Il permet à un individu de connaître ou estimer la position des éléments qui l'entourent en fonction de sa propre position. Cette représentation de l'espace dépend donc de la position mais également de l'orientation du sujet. Ce n'est donc pas un système invariant. Ainsi, une interprétation égocentrique de la phrase « Il y a un banc devant un arbre » serait que le banc est situé entre l'arbre et la position du sujet.

Un système de référence allocentrique est basé sur l'environnement et non sur le sujet. Il peut être utilisé à différentes échelles, par exemple par rapport à un environnement correspondant à un ensemble d'objets, une pièce, un bâtiment, un quartier, une ville, un pays ou encore un continent. Ce système est souvent appelé géocentrique notamment lorsqu'il est question de grands espaces. Contrairement au système égocentré, il ne varie pas selon la position du sujet. Ce système permet de représenter la configuration d'un environnement en fonction des éléments qui le composent, c'est-à-dire en fonction de leur localisation relative, à partir d'indices d'orientation (orientation des objets ou d'une pièce) ainsi que des points cardinaux.

2.3. Les différentes connaissances spatiales

Trois grands types de connaissances spatiales sont généralement distinguées dans les recherches s'intéressant aux représentations spatiales d'itinéraires ou à la navigation ; les connaissances des repères, la connaissance de type route et la connaissance de type survol.

2.3.1 La connaissance des repères

La navigation peut être facilitée par la présence d'indices appelés *repères* qui permettent de jalonner le parcours et ainsi de ne pas se perdre (Figure 1). La connaissance des repères est souvent considérée comme la première étape d'acquisition d'une représentation mentale d'itinéraire. Le terme *repère* vient du latin *reperire* « retrouver » et désigne une entité souvent

visuelle qui est perçue et mémorisée de par ses propriétés comme sa forme ou structure unique (Cohen & Schuepfer, 1980 ; Golledge, Smith, Pellegrino, Doherty & Marshall, 1985 ; Presson & Montello, 1988), ainsi que son rôle socioculturel ou symbolique (Lynch, 1960 ; Appleyard, 1969). C'est un lieu plus important, plus distinctif et plus facilement mémorisé que les autres (Presson, 1987). Il présente un rôle organisationnel dans la structure d'un environnement et peut être défini par sa position (par exemple, dans la description verbale « au bout de la rue »). Il peut s'agir de noms de rues, de bâtiments, de croisements. Selon Denis (1997), il existe des repères 3D correspondant à des éléments de l'environnement comme des bâtiments spécifiques (par exemple, une église) ou des indications de directions (par exemple, un panneau de nom de rue) et des éléments 2D sur lequel les déplacements sont exécutés (par exemple, une route). Notons qu'il existe de nombreuses définitions de la notion de repères et que parmi celles-ci, deux caractéristiques sont habituellement présentes : les repères attirent l'attention par leurs propriétés saillantes et ils sont culturellement reconnus par un ensemble d'individus. Les repères de grande taille, visibles de loin (comme une tour, une église ou un grand monument), sont appelés repères « globaux » ou « distaux », alors que les repères qui ne sont visibles que dans une zone limitée sont appelés repères « locaux » ou « proximaux ».



Figure 1 : Exemple de repères (Pont des arts, Hôtel de ville, nom de rue et place de la bastille, à Paris)

Les repères présentent trois fonctions clefs (Denis, 1997) :

- signaler l'emplacement d'une action à accomplir (par exemple, « *lorsque tu es devant la poste, tourne à droite* »)
- situer d'autres repères souvent moins visibles (par exemple, « *tu vas voir une église avec à sa gauche un mémorial, juste à gauche de ce mémorial, tu verras le petit chemin que tu empruntes* »)
- confirmer le chemin (par exemple, « *tu prends la première rue à droite, dans cette rue tu verras la boulangerie* »).

Suivant la fonction du repère, il pourra ainsi être question de repères « décisionnels » permettant de signaler un emplacement de changement de direction et de repères « confirmatoires » ou « de confirmation » en l'absence de changement de direction, pouvant rassurer la personne sur le fait d'être sur la bonne route.

2.3.2 La connaissance de type « route »

Une autre connaissance spatiale est celle qui permet l'acquisition d'une représentation du chemin entre les repères (Figure 2). En effet, l'utilisation de repères au cours d'une navigation peut aider à ne pas se perdre mais n'est pas suffisante pour assurer que l'ensemble du parcours sera correctement suivi. Un itinéraire est composé d'un enchaînement de déplacements dont il faut se souvenir (avoir tourné à gauche, puis marché sur 300 mètres, puis tourné à droite). La connaissance de type « route » est la connaissance de l'itinéraire, étape par étape, incluant l'ordre chronologique des repères, la séquence d'événements, les directions prises, les distances parcourues. Elle inclut donc des informations statiques et dynamiques (Buchner & Jansen-Osmann, 2008 ; Farran, Courbois, Van Herwegen & Blades, 2012) fournissant des chemins sensori-moteurs potentiels entre des repères (Cohen & Schuepfer, 1980). Ce type de connaissance présente des informations procédurales, et est souvent considéré comme étant la deuxième étape d'acquisition d'une représentation d'itinéraire.

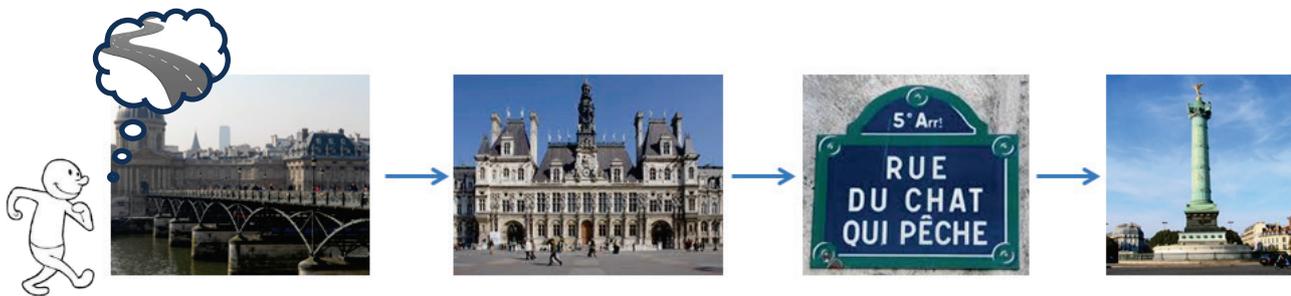


Figure 2 : Exemple d'une connaissance de type route (inspiré par Ashraf, 2005)

De nombreux chercheurs s'intéressent à l'intégration du chemin (« *path integration* ») qui peut être rapprochée d'une connaissance de type route en l'absence de repère. Cette connaissance permet aux êtres vivants de se déplacer en fonction d'informations internes sur leur position, leur orientation ou les mouvements qu'ils ont effectués. C'est ce qui nous permet de réaliser un chemin sans réfléchir, c'est-à-dire de façon automatique, sans mobiliser notre attention, mais également de retrouver notre chemin dans le noir.

2.3.3 La connaissance de type « survol »

Enfin, il est possible de se faire une représentation mentale globale de l'environnement (Figure 3). La connaissance de type « **survol** » est une vision d'ensemble de la configuration de l'environnement. La capacité à construire ce type de représentation nous permet d'arriver à notre objectif à partir de tout point, même lorsque des changements se produisent (par exemple, une route fermée pour cause de travaux). Elle permet donc de trouver des raccourcis ou des détours empruntant des chemins n'ayant jamais été utilisés auparavant.

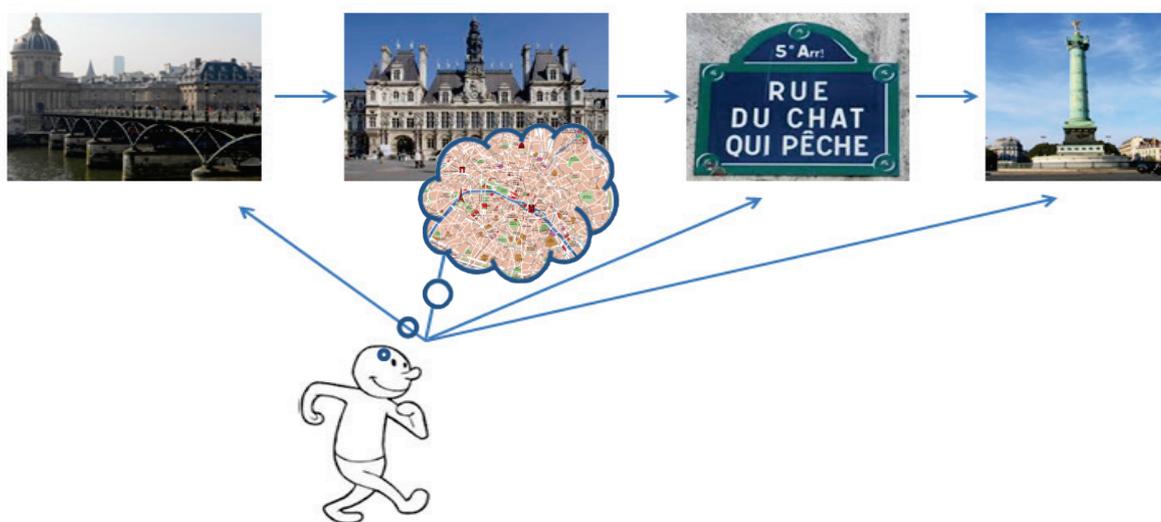


Figure 3 : Exemple de connaissance de type « survol » comprenant les connections et raccourcis entre différents repères et une vision de type « carte mentale »

2.4. De la connaissance des repères à la connaissance en survol

2.4.1. Les modèles développementaux : de Siegel et White (1975) à Jansen-Osmann

Selon Piaget et Inhelder (1948), l'évolution de la cognition spatiale chez l'enfant suit la séquence de stades jalonnant l'ensemble du développement cognitif dans tous les domaines de connaissance (voir Chapitre 1, section 1.2 ci-dessus). La capacité à construire des représentations spatiales dans des environnements à grande échelle se développe avec la maturité cognitive, incluant par exemple les capacités générales de planification, de raisonnement et de mémorisation, la capacité d'adopter des points de vue différents sur une même scène spatiale, les représentations des relations spatiales ou des actions.

De même, selon Siegel et White (1975) ce développement se fait par paliers. Notamment, selon eux, les enfants réaliseraient initialement un apprentissage général d'indices (de repères), puis apprendraient à construire des représentations plus précises. Les repères seraient ensuite liés à d'autres informations, permettant le développement de petites cartes cognitives (ou "minimaps"). L'enfant doit alors assembler des petites cartes et cet assemblage permettra enfin de construire une vision générale de l'environnement. Siegel et White postulent donc que le développement des connaissances spatiales commence par la **connaissance des repères** puis passe par la **connaissance de type « route »** pour finir par l'**obtention d'une vue d'ensemble**, dit « **de survol** ». Ils proposent une évolution impliquant d'abord une compréhension de l'environnement **égocentrique** puis une compréhension **allocentrique** (ou exocentrique). Comme on l'a vu plus haut, le modèle de Piaget et Inhelder (1948) propose une conception du développement comme faisant intervenir une séquence développementale de type compréhension topologique puis projective et enfin euclidienne, parfois appelée « macrogenesis ». Cette hypothèse est à la base de nombreuses études ultérieures et a été partiellement étayée par Cousins, Siegel et Maxwell (1983). Ces auteurs ont évalué les connaissances spatiales d'enfants de 7, 10 et 13 ans suite à une navigation réelle dans un campus. L'ensemble des enfants a réussi à retrouver le chemin. Cependant, ils ont eu plus de difficultés à organiser correctement les segments de route, encore plus pour évaluer les échelles, et ont peu réussi en ce qui concerne la connaissance de la configuration de l'environnement, c'est-à-dire la construction d'une vue d'ensemble (estimer les positions des repères). La plupart des performances augmentent bien avec l'âge. Toutefois, quelques enfants ont réussi des tâches difficiles et échoué à des tâches de difficulté intermédiaire, confortant l'idée que l'acquisition n'est peut-être pas entièrement linéaire.

Le modèle « macrogenesis » a eu beaucoup d'influence tout en étant très critiqué pour plusieurs raisons comme: (1) il explique difficilement les différences individuelles et certains aspects du développement de l'enfant ou du vieillissement ; (2) l'ordre d'apparition des connaissances (repères puis route puis survol) n'explique pas l'observation de connaissances allocentriques précoces, (3) si l'on suppose que l'apprentissage se fait par l'expérience du mouvement, alors la connaissance de type route devrait être plus précoce .

L'importance du point de vue adopté dans l'acquisition d'informations spatiales est souvent mise en évidence. L'existence de deux points de vue majeurs est généralement acceptée.

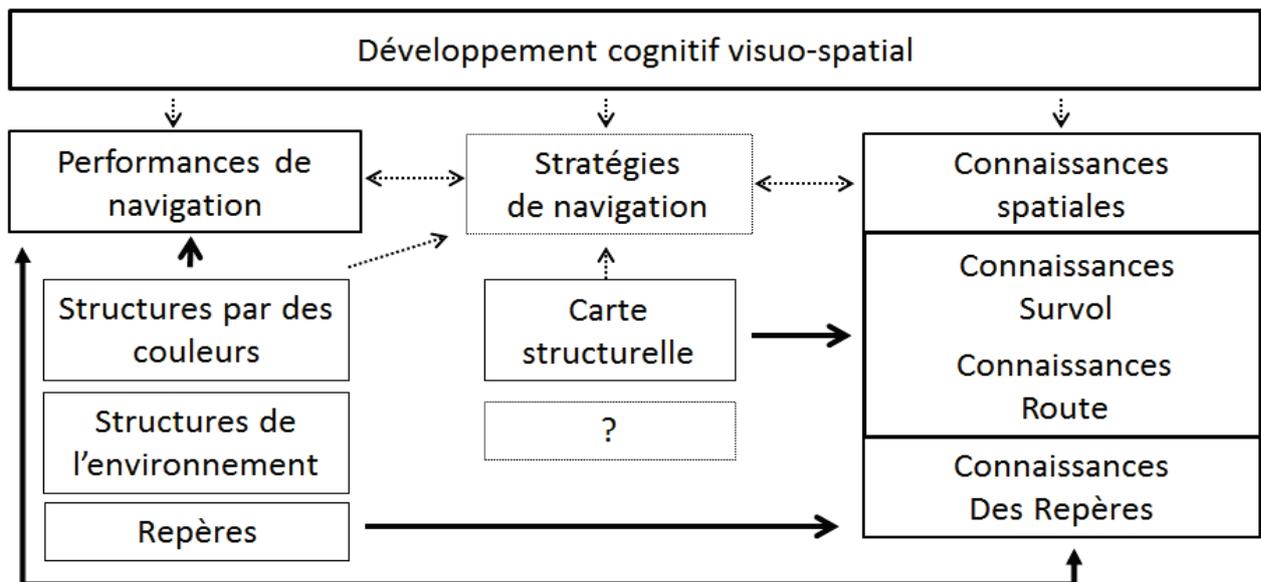


Figure 4 : Modèle de développement cognitif visuo-spatial de Jansen-Osmann (2007)

Jansen-Osmann (2007) propose un nouveau modèle (Figure 4), en continuité avec le modèle de Siegel et White (1975), en y ajoutant notamment un niveau comportemental. Ainsi, les trois types de connaissances spatiales (de type repères, route et survol) proposées par Siegel et White (1975) sont intégrés. Elle considère qu'il y a une dissociation entre les performances de navigation et les connaissances spatiales. En effet, l'apprentissage d'une carte influencerait les connaissances spatiales mais pas les comportements de navigation. À l'inverse, la régularité d'un labyrinthe influencerait les comportements de navigation mais pas les connaissances spatiales (Jansen, Schmid & Heil, 2007). Dans son modèle, les performances de navigation sont déterminées par la structure géométrique (régulière ou non), par les couleurs de l'environnement et par les repères. Ainsi, la structure de l'environnement influence directement les performances de navigation mais pas les connaissances spatiales. Par exemple, lorsqu'un environnement est complexe, les performances seront moindres, mais les connaissances spatiales seraient les mêmes. La connaissance des repères interagit directement avec les performances de navigation. Les stratégies utilisées influencent les performances de navigation et les connaissances spatiales. Un autre aspect important de ce modèle est la prise en compte du développement des habiletés visuo-spatiales sur le développement des connaissances et des capacités de navigation. Ce modèle, en cours d'élaboration, présente donc l'intérêt d'intégrer les connaissances, les comportements et les habiletés. Nous allons présenter le développement des connaissances spatiales et des comportements qui lui sont associés. Puis, lors de la présentation des spécificités des représentations, le rôle des habiletés cognitives sera discuté.

2.4.2. Evolution chez l'enfant : de la connaissance des repères à la connaissance en survol

Pendant son développement cognitif, l'enfant devient de plus en plus apte à réaliser avec succès des tâches de plus en plus complexes telles que la navigation. Avec l'âge, on observe un ensemble de phénomènes, comme par exemple : une amélioration des capacités de représentation spatiale, c'est-à-dire une diminution du nombre d'erreurs de navigation ; une meilleure reconnaissance des lieux et donc des repères et des directions ; une plus grande précision dans les tâches, comme pour le placement de repères ; une plus grande rapidité de navigation ; l'utilisation de stratégies plus variées et plus complexes.

L'utilisation de repères dans la navigation

Si les enfants arrivent dès les premiers mois à utiliser des repères ou des combinaisons de repères afin de retrouver des objets cachés (ex. Bullens et al., 2010a), qu'en est-il de l'utilisation de repères au cours d'une navigation dans des grands espaces ? Cornell, Siegel et Maxwell (1989) ainsi que Cornell, Heth et Broda (1989) ont proposé un trajet réel à des enfants de 6 et 12 ans. Cornell, et al. (1989) montrent qu'informer les enfants de la nécessité de faire attention au chemin pour pouvoir le refaire les aide. Dans les deux études, les auteurs constatent que la désignation des repères aux intersections (repères proximaux) aide les enfants (6 et 12 ans) à reproduire l'itinéraire avec succès. En revanche, montrer les repères distaux aide uniquement les enfants les plus âgés à maintenir le cap lorsqu'ils sont placés en dehors de la route initiale. Ce résultat suggère que les enfants les plus jeunes s'appuient uniquement sur leur point de vue direct (principalement égocentrique) alors que les plus âgés utilisent également des repères distaux qui sont utiles pour avoir une vue d'ensemble (allocentrique). Dire à des enfants (de 6 et 12 ans) et à des adultes de se retourner pendant la réalisation de la navigation aide également les enfants les plus âgés (12 ans) et les adultes à reproduire le chemin dans le sens inverse, mais pas les enfants de 6 ans (Cornell, Heth & Rowat, 1992). Dans une autre étude en navigation réelle, Heth, Cornell et Albert (1997) montrent que les enfants de 8 et 12 ans sont capables de mentionner quatre indices temporaires préalablement désignés (exemple un vélo) mais également de mentionner des repères non préalablement désignés. Toutefois, les enfants de 12 ans mentionnent d'eux-mêmes plus de repères, notamment plus de repères stables distaux, et sont moins sensibles aux changements apportés aux repères temporaires (par exemple, le déplacement d'un vélo). Rappelons que selon Lehnung et al. (1998), dans leur étude de recherche d'objets dans un labyrinthe de Kiev, la transition entre une stratégie proximale et une stratégie plutôt distale serait réalisée vers 7 ans.

Presson (1987) a étudié le rôle structurel des repères pour des enfants de 6-7 et 9-10 ans. Il a présenté aux enfants des maquettes d'une ville et d'une ferme avec des repères présentés au cours d'une histoire selon deux conditions. Dans la condition « repères » (hétérogène), certains repères sont visités de nombreuses fois et d'autres une seule fois (et un repère n'est pas visité), alors que dans la condition contrôle (homogène), chaque repère est visité deux fois. Les enfants les plus âgés placent mieux les repères que les plus jeunes mais ils estiment de la même manière les distances. Les repères sont mieux placés lorsqu'ils ont été appris dans une condition hétérogène, notamment les repères vus le plus souvent. Ces repères sont par ailleurs placés en premier et servent de base de placement pour les autres éléments. Les distances inter-repères sont sous-estimées dans les deux conditions mais d'autant plus dans la condition repères hétérogènes. La fréquence de visites d'un élément favorise donc la mémorisation de son emplacement et l'estimation des distances de la même façon dans les deux groupes, mais les performances progressent avec l'âge. La position des repères semble jouer un rôle dans leur mémorisation.

Dans une étude mettant en jeu l'importance de la configuration, Cohen et Schuepfer (1980) ont demandé à des enfants de 7-8 et 11-12 ans et des jeunes adultes d'apprendre l'itinéraire d'un labyrinthe présenté à l'aide de diapositives. Le labyrinthe contenait des indices visuels positionnés de trois façons possibles : adjacents à un changement de direction, adjacents à un carrefour sans changement de direction ou encore adjacents à aucune prise de décision. Les repères adjacents à un changement de direction sont mieux mémorisés que les autres repères. Les enfants les plus jeunes (7-8 ans) mentionnent moins de repères que les enfants les plus âgés et que les adultes. Jansen-Osmann et Wiedenbauer (2004a) ont répliqué cette étude en modifiant le mode de présentation, notamment en remplaçant les diapositives du labyrinthe par une navigation virtuelle dans ce même labyrinthe. Ils confirment les résultats précédents à une exception près : ils ne trouvent pas de différences entre les performances des enfants les plus âgés (11-12 ans) et celles des adultes. Ce résultat suggère qu'une navigation virtuelle, proche d'une navigation réelle, facilite l'intégration de l'itinéraire. Il peut également y avoir un effet plafond, la tâche n'étant pas assez difficile pour montrer l'ensemble des capacités ou des difficultés des individus ayant réussi à construire une représentation basique. Dès l'âge de 7 ans, les enfants sont capables de sélectionner les repères stratégiques pour la navigation. Les plus jeunes sont bien entendu moins prolifiques et spécifiques que les plus âgés au cours du rappel. Contrairement aux jeunes enfants qui baseraient leur connaissance sur les repères, les enfants plus âgés et les adultes utiliseraient d'autres stratégies qui leur permettraient de retrouver leur route. D'autres études permettent de comprendre quelles informations semblent influencer ces connaissances.

Jansen-Osmann et Fuchs (2006) ont demandé à des enfants de 7-8 et 11-12 ans et à des jeunes adultes d'explorer des labyrinthes de trois types : un labyrinthe sans repères, ce même labyrinthe comportant 12 indices de trois catégories différentes (fruits, animaux, instruments de musique) présentés de façon soit ordonnés soit désordonnés. Une présentation ordonnée des indices consistait à associer une action à une catégorie d'indices visuels, par exemple: «lorsqu'il y a un fruit, il faut tourner». Les résultats indiquent que la présence de repères facilite l'apprentissage, plus d'essais étant nécessaires pour le labyrinthe ne comprenant aucun repère que celui avec repères. Le bénéfice des repères est attesté aussi bien chez les enfants que chez les adultes mais il est beaucoup plus important chez les enfants de 7-8 ans. La présence de repères n'a toutefois pas d'influence sur les comportements d'orientation (retour au point de départ, demi-tour sur le même segment, segment emprunté deux fois) et les connaissances spatiales (estimation de directions, trouver le détour le plus court, positionner une cible sur une carte), considérées comme le reflet de la représentation spatiale en survol. De plus, la catégorisation des repères (association entre une action et un groupement sémantique) facilite également l'encodage.

Hund et Plumert (2003) se sont aussi intéressés au rôle de la catégorisation sémantique sur la connaissance spatiale. Ils ont demandé à des enfants de 7, 9 et 11 ans et des adultes de mémoriser l'emplacement d'éléments de quatre catégories (animaux, véhicules, nourritures, vêtements) dans différentes conditions. Les éléments d'une même catégorie étaient placés soit tous dans le même quadrant, soit au hasard dans une boîte. Les éléments placés par catégorie (par exemple, l'ensemble des fruits dans le quart devant-droit de la boîte) sont replacés trop près les uns des autres par les participants. La disposition des éléments est donc biaisée par leur appartenance à une même catégorie sémantique. Ce biais diminue avec l'âge mais également au cours de l'apprentissage (Recker, Plumert, Hund & Reimer, 2007).

En conclusion, la présence de repères aide à la mémorisation d'itinéraires mais n'est pas indispensable. Nous avons pu observer que les enfants apprennent tout d'abord à prêter attention aux repères. La capacité de rappel et de placement des repères augmente au cours du développement. Initialement, les jeunes enfants ont tendance à se servir des repères proximaux mais, vers 10-12 ans, ils deviennent capables d'utiliser également les repères distaux. Ce développement est également lié à leur préférence initiale pour un point de vue égocentrique, puis allocentrique. Toutefois, même si les jeunes enfants semblent avoir tendance à favoriser un point de vue égocentrique, ils arrivent à utiliser d'autres stratégies. La capacité à utiliser des

informations et des stratégies variées et efficaces semble se développer vers 10-12 ans. Notons que la catégorisation des indices facilite les performances de mémorisation mais biaise les performances précises de localisation.

Connaissance et influence de la configuration spatiale d'un environnement

La connaissance de la configuration spatiale d'un environnement est souvent étudiée à l'aide d'une carte ou d'une maquette ou par la capacité de navigation lors d'une modification de l'environnement.

Dans l'étude de Peter, Glück et Beiglöck (2010), des enfants de 3, 4, 5 et 6 ans doivent retrouver un bâtiment préalablement vu sur une maquette de ville en le montrant sur une carte. Les éléments sont de couleurs et tailles différentes, ou certains éléments sont de la même forme et couleur mais la carte est présentée soit dans le même sens soit dans un sens différent de la maquette. Les résultats montrent que, dès 4 ans, plus de la moitié des enfants arrivent à comprendre une représentation symbolique simple (la carte identique). Cependant, la majorité des enfants de 6 ans utilise les relations spatiales entre les éléments permettant de construire une vision d'ensemble de l'environnement et seuls deux enfants de 5 ans (mais aucun de 6 ans) réussissent à utiliser leurs compétences de rotation mentale pour trouver les éléments (alors que dès 5 ans la majorité des enfants est capable de réaliser une rotation mentale). Herman (1980) a demandé à des enfants de mémoriser une maquette (en marchant autour ou à travers la maquette dans un temps limité, accompagné par un adulte ou dans un temps illimité mais seul), puis de replacer les éléments de cette maquette de mémoire. Dès 6 ans, les enfants sont capables de replacer des repères sur une maquette. La proportion de placements corrects, la précision des placements, et la séquence des placements diffèrent en fonction de l'âge : les enfants de 9 ans reproduisent correctement plus souvent la séquence observée que les enfants de 6 ans. Ils profitent également d'un effet apprentissage entre les essais plus important que les enfants de 6 ans. Alors qu'au premier essai, certains résultats sont identiques avec ceux des enfants de 6 ans, leurs performances deviennent meilleures pour les essais suivants. Sandamas et Foreman (2007) montrent aussi que la focalisation de l'attention par un adulte aide les enfants. Ces auteurs présentent une ville en réalité virtuelle à des enfants de 6-7, 7-8 et 8-9 ans dans trois conditions : naviguer, observer quelqu'un naviguer ou encore regarder huit points de vue (images de la ville prises de chaque côté de la ville). Les enfants de 6-7 ans (Cours Préparatoire, CP) sont moins précis que ceux de 8-9 ans (Cours Élémentaire 2, CE2) pour replacer des immeubles vus dans la ville sur une maquette de la ville. La condition passive (observer quelqu'un naviguer) permet de

meilleurs placements, notamment lors d'un deuxième essai, par rapport aux conditions actives (naviguer) et de présentation de photos représentant différents points de vue.

Concernant les capacités des enfants à adopter différents points de vue, l'expérience de Bullens, Iglói, Berthoz, Postma, et Rondi-Reig (2010b) de navigation dans un labyrinthe en réalité virtuelle chez des enfants de 5 à 10 ans a permis de mettre en évidence une utilisation spontanée de la stratégie égocentrique (observée chez la majorité des sujets). Cette étude montre également une utilisation progressive du point de vue allocentrique (vers 7 ans) au cours de la navigation. Toutefois, des capacités de représentation allocentrique seraient présentes dès 5 ans. Alors que 61 % des enfants de 10 ans reconnaissent le plan correspondant à un labyrinthe, seulement environ 15% des 5 et 7 ans le reconnaissent, montrant donc une évolution de la vision globale de l'environnement. Environ 50% de réussite est observé dès le premier essai pour la stratégie allocentrique à tous les âges (légère évolution avec l'âge mais non significative) et 50% des enfants de 5 ans utilisent des repères égocentriques (contre seulement 20% des 7 ans et 10% des 10 ans).

Hemmer et al. (2013) proposent une étude transversale comprenant plusieurs centaines d'enfants entre 8 et 12 ans mettant en évidence le développement de la capacité à utiliser des cartes à des fins de navigation. Cette capacité consistait à réaliser un itinéraire indiqué sur la carte et à retrouver des éléments spécifiés sur la carte, mais également à indiquer dessus des éléments importants observés au cours de la navigation et la direction de l'objectif. Les résultats montrent une évolution majeure entre 8 et 10 ans.

En conclusion, des capacités à utiliser des repères sont attestées dès l'âge de 18 mois (Haden et al., 2011) et des capacités de compréhension de représentation symbolique de l'espace dès 4 ans. Vers 6 ans, les enfants sont capables de comprendre des représentations plus complexes mais ont encore des difficultés à mettre en pratique leurs connaissances. Une augmentation régulière des capacités de placement des repères sur une carte ou une maquette est observée. Cette amélioration qualitative est également liée aux développements de capacités de vision complexe permettant ainsi aux enfants de réussir une épreuve même lors d'un changement de position.

2.4.3. Les stratégies route et survol: Quelle stratégie est la plus efficace ?

Nous avons vu ci-dessus qu'il existe différents types de représentation selon le point de vue préférentiellement adopté. En particulier, selon ce point de vue, on parlera soit de stratégie de type « route », soit de stratégie de type « survol ».

Par exemple, Thorndyke et Hayes-Roth (1982) observent que l'apprentissage d'un itinéraire à l'aide d'une carte permet un meilleur jugement des emplacements et des distances entre les objets mais qu'une navigation permet une meilleure orientation de soi en fonction des objets et une meilleure estimation des distances. Hirtle et Hudson (1991) proposent l'apprentissage d'un itinéraire à l'aide d'une carte ou de diapositives. Ils observent que les connaissances de type route sont acquises par les deux types d'apprentissage. De plus, les personnes ayant appris l'itinéraire avec une carte ont une meilleure connaissance de la configuration spatiale de l'environnement, même si certaines personnes ayant effectué un apprentissage par diapositives, arrivent à se construire une bonne représentation de la configuration. Hund et Nazarczuk (2009) proposent à des adultes un entraînement de manipulation d'informations de type route (gauche/droite) ou de type survol (point cardinaux). Suite à cet entraînement, un parcours est proposé par le biais d'informations de type route ou survol. Les sujets font globalement moins d'erreurs et sont plus rapides lorsque les indications sont de type route plutôt que de type survol. Le type d'information fournie joue donc un rôle sur les capacités à réaliser un itinéraire.

3. Spécificités des représentations spatiales et de leurs études

3.1. Les différences inter-individuelles

Certaines personnes peuvent se repérer et construire une représentation d'un environnement suite à une seule navigation, alors que d'autres évoluant dans un environnement depuis plusieurs années rencontrent toujours des difficultés à se le représenter. Ce type de différence inter-individuelle est couramment désigné par le terme « sens de l'orientation » et renvoie à l'aptitude d'un individu à retrouver son chemin. Il est souvent évalué par des auto-questionnaires étroitement liés avec les mesures comportementales (ex. Hund & Nazarczuk, 2009 ; Prestonick & Roskos-Ewoldsen, 2000). Ainsi, un bon sens de l'orientation est souvent défini par l'utilisation de stratégies de navigation variées contenant des informations de type survol (ex. Kato & Takeuchi, 2003 ; Hund & Padgitt, 2010 ; Padgitt & Hund, 2012 ; Wen,

Ishikawa, Sato, 2011, 2013). D'autres facteurs entrent en jeu dans cette aptitude : l'expertise, les habiletés visuo-spatiale et le genre.

3.1.1 L'expertise

Plusieurs études chez l'enfant (Sandamas & Foreman, 2007) et chez l'adulte (Hund & Nazarczuk, 2009 ; Maguire et al., 2000 ; Maguire, Woollett & Spiers, 2006a) montrent le rôle de l'expertise ou de l'expérience dans les performances, y compris dans le domaine des compétences spatiales. Chez l'enfant, le fait d'avoir l'habitude de se promener seul facilite les apprentissages ultérieurs de navigation. L'expérience se reflète dans les effets d'apprentissage ou la meilleure connaissance d'un environnement particulier souvent fréquenté, comme notre propre quartier. Cette expérience permet d'acquérir une expertise, c'est-à-dire un ensemble de connaissances et de compétences acquises grâce à une pratique régulière.

Certaines études observent un **effet apprentissage** entre les essais chez l'enfant (ex. Herman, 1980 ; Sandamas & Foreman, 2007) comme chez l'adulte (ex. Hund & Nazarczuk, 2009). L'étude de Sandamas et Foreman (2007) propose à des enfants de naviguer dans une ville en réalité virtuelle, puis de replacer des immeubles sur une maquette de la ville. Ces auteurs observent une augmentation de la précision de placement entre les premier et deuxième essais.

Des études montrent également un **effet de la familiarité**. En navigation réelle dans des milieux familiers ou non, Neidhardt et Popp (2010) observent des effets bénéfiques de la familiarité notamment sur les capacités de pointage chez des enfants de 5 et 8 ans. Dans une étude sur des itinéraires réels dans des bâtiments, chez l'adulte, Hölscher, Büchner, Meilinger et Strube (2009) mettent en évidence que la familiarité avec l'environnement influence la stratégie et les comportements de navigation (ex. les personnes non familières avec les bâtiments prennent plus de temps, s'arrêtent plus souvent et consultent plus la carte).

Hormis les effets d'apprentissage et de familiarité, on observe chez l'adulte un **effet de l'expertise** en navigation. Dans de nombreuses études (entre autres, Maguire et al., 2000), Maguire et ses collaborateurs ont étudié des conducteurs de taxi londoniens, montrant de meilleures capacités de navigation chez ces experts que chez des non experts. Ils montrent notamment de meilleures connaissances en survol, qui surpasseraient même celle des conducteurs de bus du fait de la variabilité plus importante des itinéraires parcourus (Maguire, et

al., 2006a). Des différences dans l'activité et la structure cérébrale des chauffeurs ont également été observés, comme nous le verrons plus en détail plus loin (voir Section 3.2).

3.1.2 Les habiletés visuo-spatiales

De nombreux chercheurs se sont intéressés aux liens entre les habiletés visuo-spatiales et les compétences de navigation chez l'enfant (Cornell, Heth & Albert, 1994 ; Fenner, Heathcote, Jerrams-Smith, 2000 ; Neidhardt & Popp, 2010; Purser et al., 2012). Les compétences spatiales constituent en effet une composante spécifique de nombreux modèles d'intelligence. Selon Fields et Shelton (2006), les habiletés spatiales seraient même à la source de différences interindividuelles, notamment les capacités de rotation mentale, de raisonnement suivant diverses perspectives, de mémorisation des positions, mais également le sens de l'orientation ou la capacité de mémorisation d'une carte.

Selon Cornell et al. (1994), les capacités de raisonnement et de représentations spatiales sous-tendraient les différences entre les performances de navigation à différents âges. Ainsi, chez l'enfant les capacités de navigation ou de connaissance spatiale sont liées avec les capacités de rotation mentale, de raisonnement ou de mémoire non-verbale (Hemmer et al., 2013 ; Fenner et al., 2000 ; Neidhardt & Popp, 2010; Purser et al., 2012).

Neidhardt et Popp (2010) rapportent une amélioration de la précision de « pointage » des repères en lien avec une amélioration des habiletés et de l'activité spatiale chez des enfants de 5 et 8 ans au cours d'un parcours réel. Fenner, et al. (2000) ont présenté un itinéraire réel dans un campus à des enfants de 5-6 et 9-10 ans, puis ont évalué leurs compétences de navigation ainsi que leurs habiletés visuo-spatiales et linguistiques. Ils ont ainsi réalisé une analyse en répartissant les participants selon leur habileté visuo-spatiale (forts versus faibles) et une autre en les répartissant selon leurs compétences verbales (forts versus faibles). Le nombre d'erreurs de navigation est plus important chez les personnes ayant de faibles habiletés visuo-spatiales que chez celles qui ont d'importantes capacités visuo-spatiales. En revanche, les compétences langagières ne semblent pas influencer les performances de navigation. Purser et al., (2012) observent un lien entre les performances de navigation dans un labyrinthe virtuel et les performances de mémoire verbale et visuo-spatiale à court terme - lien qu'ils expliquent par les capacités d'inhibition.

Toutefois, la compétence spatiale ne serait pas une habileté ou capacité globale monolithique. Il s'agit plutôt de compétences variées, constituées de plusieurs composantes bien distinctes, même si certaines interagissent entre elles. Ainsi, dans leur étude, Quaiser-Pohl, Lehmann et Eid (2004) proposent à des enfants de 7, 9 et 12 ans, des épreuves d'habiletés spatiales (Rotation mentale, test du niveau d'eau et « Rod and frame ») et leur demandent également de dessiner un plan de leur quartier. Ils constatent une faible relation entre les tests d'habileté spatiale et les connaissances de l'environnement. Ils concluent à une distinction entre les processus utilisés pour traiter des informations de grande échelle (environnement ne pouvant être perçu en un seul point de vue) et ceux de petite échelle (relations spatiales entre objets perçues en une seule fois), c'est-à-dire à une distinction entre des compétences spatiales, d'une part, et la construction d'une représentation spatiale, d'autre part.

3.1.3 Les hommes sont-ils meilleurs que les femmes ?

Il est souvent considéré que les femmes ont des capacités catastrophiques de navigation, au contraire des hommes qui seraient experts en la matière. Néanmoins, cette affirmation est sujette à débats, et la question est de savoir s'il s'agit plutôt d'un mythe que de la réalité. Des chercheurs se sont intéressés à cette problématique, d'autant plus délicate lors de débats sur le genre, et montrent des résultats contradictoires.

Les comparaisons inter-genre concernent principalement deux aspects : (1) les comportements, points de vue préférentiels ou stratégies de navigation et (2) les performances. L'effet du genre a été évalué dans certaines des études précédemment mentionnées.

Certaines études ont mis en évidence des différences de comportement de navigation chez l'enfant. Ainsi, dans l'étude d'Herman (1980) examinant la mémorisation de maquettes, aucune différence de genre n'est observée pour la majorité des mesures. Lors d'explorations libres, seule la durée d'exploration de maquette de ville est plus longue chez les garçons de 6 ans que chez les filles du même âge, sans aucune différence de performance. Dans l'étude de Jansen-Osmann, Schmid et Heil (2007), des enfants de 7-8 et 11-12 ans et des adultes ont exploré des labyrinthes en réalité virtuelle. Lors de ces explorations, les filles parcourent de plus petites distances que les garçons, c'est-à-dire qu'elles explorent moins. Chez l'adulte Hölcher et al. (2009) montrent que les hommes consultent moins longtemps les cartes que les femmes. En navigation réelle, Hund et Padgitt (2010) constatent que les femmes utilisent plus de stratégies de type route, mais moins d'informations cardinales, alors que les hommes utilisent plus la stratégie de survol et indiquent plus d'informations cardinales.

Par ailleurs des différences de performances notamment d'utilisation de carte ont été mises en évidence dans certaines études. Par exemple, dans l'étude d'Herman (1980), une exploration guidée permet aux garçons d'être plus précis que les filles dans le positionnement des repères sur la maquette. Peter et al. (2010) comparent les capacités d'enfants de 3 à 6 ans à localiser des repères sur une carte dans trois conditions (avec des éléments distinctifs ou des éléments d'une même couleur présentés dans le même sens ou dans un sens différent de l'observation initiale, nécessitant de réaliser une rotation mentale). Ils observent de meilleures localisations de repères chez les garçons de 6 ans lorsque les éléments sont de même couleur et présentés dans le même sens, mais pas de différence de genre pour les enfants de 3 à 5 ans et pas pour les autres conditions. Hemmer et al. (2013) observent une meilleure utilisation d'une carte par des garçons de 8-12 ans, notamment sur la capacité à prendre la bonne direction (mais pas à retrouver des repères sur la carte ou sur l'itinéraire réel). Dans leur étude sur le rôle des repères dans la mémorisation de labyrinthe virtuel chez des enfants de 7-8 et 11-12 ans et des adultes, Jansen-Osmann et Fuchs (2006) observent que les filles positionnent les repères sur la carte de façon légèrement moins précise que les hommes, mais pas d'autre différence (directions, meilleurs détours et rappel de repères). Dans l'étude de Jansen-Osmann et al. (2007), alors qu'aucun effet du genre n'est observé sur l'estimation de distance et la capacité de trouver le chemin le plus court, les filles positionnent moins bien les éléments sur une carte. Au cours de descriptions d'itinéraires réels chez l'adulte, les femmes citent plus de repères que les hommes (Denis, 1997).

Toutefois, ces quelques différences de performances sont mises en causes par des résultats contradictoires ou à nuancer. En effet, très peu de performances semblent varier selon le genre et certaines études ne trouvent aucune différence, que ce soit chez l'enfant pour une tâche de pointage (Neidhardt & Popp, 2010), ou de localisation de repères sur une maquette (Sandamas & Forman, 2007), comme chez l'adulte (ex. Hund & Nazarczuk, 2009 ; Hund & Padgitt, 2010).

Les conclusions de ces quelques études sur l'effet du genre ne sont pas unanimes. La majorité des études ne montre aucune différence dans les performances de navigation ou les connaissances des repères chez les hommes et les femmes, contrairement aux idées reçues. Quelques études montrent une moins bonne précision des sujets de sexe féminin pour placer un repère sur une carte ou une maquette, et cela dès l'âge de 6 ans chez les enfants. Par ailleurs, des différences comportementales sont parfois observées, les garçons prenant plus de temps mais

consultant moins les supports. Enfin, certaines études observent des différences dans les stratégies utilisées, les femmes seraient meilleures ou plus précises dans l'utilisation de stratégie de type route et les hommes meilleurs avec la stratégie de type survol. Une différence serait également visible dans leurs description verbales, les femmes présentant de meilleures performances ou étant plus prolixes pour fournir des informations de type repères, les hommes pour fournir des informations cardinales.

3.2. Les bases neurales

Des chercheurs se sont intéressés à la localisation de la mémoire spatiale dans le cerveau. O'Keefe et Nadel (1979) mentionnent le rôle primordial de l'**hippocampe** dans la mémoire spatiale et la navigation. L'hippocampe nous permet de construire une représentation de notre environnement et de connaître notre propre position. O'Keefe et Dostrovsky (1971) ont en effet observé chez le rat des cellules de l'hippocampe très spécifiques. Ces cellules neuronales s'activent lors de déplacements et plus précisément lorsque l'animal se trouve à certains emplacements particuliers. Chaque neurone représente un emplacement particulier de l'environnement (d'où leur nom de « cellules de lieu »). Quelques années plus tard, Ranck (1985) découvre des cellules actives lorsque la tête de l'animal est orientée dans une direction spécifique ; ce sera donc les « cellules d'orientation de la tête ». Plus récemment, d'autres neurones ont été découverts dans la région dorso-latérale du cortex entorhinal médian. Ces neurones s'activent ensemble, pour plusieurs points de l'environnement, formant ainsi une grille dépendante des repères externes et des informations internes (« cellules de grille ») et formant un maillage de l'espace dans lequel l'animal se déplace (Hafting, Fyhn, Molden, Moser & Moser, 2005). Différentes cellules de l'hippocampe et du cortex entorhinal médian seraient donc impliquées dans la mémoire spatiale chez l'animal, mais qu'en est-il de l'Homme ?

Parmi les nombreuses études menées chez l'Homme, certaines sont basées sur les conséquences de lésions cérébrales (ex. Maguire, Burke, Philips & Saunton, 1996 ; Spiers, Burgess, Hatley, Vargha-Khadem & O'Keefe, 2001 ; pour revue : Kessels et al., 2001 ; Broadbent, Squire & Clark, 2004 ; Kumaran et al., 2007), d'autres font intervenir des techniques non invasives permettant d'observer l'activité cérébrale (ex. Maguire et al., 1998 ; Abrahams et al., 1999 ; Maguire, Burgess & O'Keefe, 1999 ; Maguire et al., 2003). Ces travaux ont conforté l'idée que l'hippocampe joue un rôle primordial dans la mémoire spatiale, et plus précisément

dans la navigation (Abrahams et al., 1999 ; Maguire et al., 1996, 1998, 1999 ; Spiers et al., 2001 ; Broadbent et al., 2004). Ainsi, lors de lésion de l'hippocampe bien souvent accompagnées de lésions du gyrus parahippocampique et du lobe temporal médian, un déficit de mémoire spatiale est observé dans un ensemble de tâches variées d'apprentissage de labyrinthe, de mémoire de travail visuo-spatiale, de localisation d'objets et de positions d'individu (pour une revue, Kessels et al., 2001). Certaines études observent de plus une latéralisation des fonctions de l'hippocampe avec, à droite plutôt la localisation d'objets ainsi que les relations spatiales topographiques (par exemple : localisation ou apprentissage de labyrinthe) et à gauche plutôt le contexte épisodique, autobiographique de la représentation (pour une revue, Kessels et al., 2001 et Burgess, Maguire & O'Keefe, 2002). Par exemple, Maguire, Nannery et Spiers (2006b), se sont intéressés aux connaissances topographiques statiques de Londres (reconnaissance visuelle de repères, jugement de proximité entre repères, jugement de distances entre repères, placement de repères sur une carte et pointage de repères) ainsi qu'aux capacités de navigation en réalité virtuelle dans Londres. Ils ont évalué ces connaissances dans un groupe contrôle de conducteurs de taxi et chez un ancien conducteur de taxi ayant une lésion hippocampique bilatérale. Ce dernier avait des performances comparables aux autres conducteurs de taxi lors des épreuves de connaissances topographiques et pour une partie des performances de navigation. Toutefois, lors de la navigation, il avait des difficultés à trouver la bonne route lorsque celle-ci n'empruntait pas préférentiellement les artères centrales de la ville. L'hippocampe ne serait alors pas nécessaire pour la connaissance topologique mais le serait pour la navigation dans un milieu connu (notamment lorsqu'il est nécessaire d'utiliser une connaissance détaillée de l'environnement).

Eleanor Maguire et son équipe ont également réalisé plusieurs études d'imagerie cérébrale comparant des experts en navigation spatiale (des conducteurs de taxis londoniens) à des sujets contrôles non experts en navigation spatiale (Woollett & Maguire, 2010, 2011). Notons qu'afin d'obtenir leur accréditation, les conducteurs de taxi londoniens doivent entre autres connaître l'ensemble du réseau routier de Londres, soit 25 000 rues et des centaines de repères, ce qui suppose donc qu'ils ont construit une excellente carte cognitive de cette ville. Maguire et ses collaborateurs observent une plus grande activation de certaines aires cérébrales, notamment de l'hippocampe (postérieur), en navigation en réalité virtuelle chez ces experts. Ces auteurs observent également des modifications de densité de matière grise dans l'hippocampe liée au temps passé comme conducteur de taxi (et non pour les conducteurs de bus, par exemple), c'est-à-dire liée à une expérience de navigation variée (ex. Maguire et al., 2000 ; Maguire et al., 2003 ; Maguire et al., 2006a). Plus cette expérience est importante, plus la zone postérieure de

l'hippocampe est dense et plus la zone antérieure petite. Cette différence ne serait pas innée mais bien liée à une plasticité cérébrale de l'hippocampe en fonction de l'expérience (Maguire et al., 2003). Toutefois les chauffeurs de taxi ont plus de difficulté à effectuer de nouveaux apprentissages que les conducteurs de bus (Maguire et al., 2006a). La zone antérieure de l'hippocampe servirait donc aux nouveaux apprentissages spatiaux (Maguire et al., 2006b). Dans des comparaisons d'experts, il est difficile de savoir si les différences observées sont dues à l'expérience des sujets ou si ces personnes sont devenues chauffeurs de taxi du fait d'une prédisposition, c'est-à-dire de leurs différences interindividuelles initiales. Pine et al. (2002) ont comparé l'activité cérébrale d'adolescents et d'adultes lors d'une tâche de navigation spatiale. Ils ont observé des différences d'activation dans le lobe frontal et médio-temporal antérieur droit lors d'un suivi d'itinéraire. Les adultes avaient de meilleures performances allocentriques associées à des activités du cortex temporo-pariétal et du cerebellum (principalement gauche). Les différences seraient donc bien dues à l'expérience.

En conclusion, bien que la mémoire spatiale fasse principalement intervenir l'hippocampe, le rôle **d'autres régions cérébrales** a également été mis en évidence. Le gyrus parahippocampique est impliqué dans l'identification d'objets, de bâtiments, de repères et de scènes spatiales en deux dimensions (surtout la géométrie/configuration). Le lobe temporal médian permet la mise à jour automatique de l'orientation de la représentation spatiale. Le lobe pariétal intervient dans les informations égocentrées. Le lobe frontal sert en quelque sorte d'horloge interne permettant de fournir un contexte spatio-temporel. Enfin le cortex préfrontal permet de planifier les détours de navigation ou l'utilisation de stratégies de récupération (Burgess *et al.*, 2002).

3.3. Utilisation de la réalité virtuelle pour l'étude des représentations d'itinéraires

Comme nous l'avons déjà vu ci-dessus, la réalité virtuelle est de plus en plus utilisée dans l'étude des représentations d'itinéraires. L'utilisation de cette méthode a été validée dans l'étude des représentations spatiales, aussi bien chez l'adulte que chez l'enfant (Jansen-Osmann, 2007) et elle présente de nombreux avantages. C'est tout d'abord une technique écologique et ludique, favorisant la motivation des participants. De plus, cet outil permet de contrôler et modifier l'environnement en fonction des objectifs de la recherche, par exemple de manipuler la

configuration de la ville, la richesse de l'environnement (environnement varié, avec évènements...), le choix des repères, leurs caractéristiques, leur emplacement, etc. Ces contrôles permettent également d'assurer la réalisation d'une navigation dans des conditions identiques pour tous les individus. De plus, les participants, en particulier les enfants, peuvent naviguer en toute sécurité et sans fatigue particulière.

La réalité virtuelle est un outil qui permet de mesurer des capacités qui peuvent être transférées en navigation réelle, même si quelques études ont montré des distorsions de perception des distances. Cet outil peut faciliter l'apprentissage d'itinéraires par rapport à une présentation sous un format texte ou à l'aide de diapositives (par exemple, Cohen & Schuepfer 1980 versus Jansen-Osman & Wiedenbauer, 2004a). Il permet de proposer des navigations actives ou passives et d'enregistrer tout un ensemble de comportements, comme les choix ou les hésitations au cours de la navigation active. Wallet et al. (2011) ont comparé le transfert vers le monde réel d'informations apprises de manière active ou passive, dans des villes virtuelles détaillées ou non détaillées. Ils observent de meilleures performances de navigation dans le monde réel, de réalisation de carte et de classement chronologique de scènes réelles lors de la présentation d'une ville dans un environnement virtuel détaillé. L'apprentissage actif permet de meilleures performances de navigation et de cartographie que l'apprentissage passif, mais c'est l'inverse pour le classement chronologique des photographies du monde réel. Les différences entre un apprentissage actif et un apprentissage passif font actuellement l'objet de nombreuses études, examinant comment différentes informations entrent en jeu : informations idiothétiques, de prise de décision, d'attention et de mémoire de travail (Chrastil & Warren, 2012).

Résumé : Les représentations spatiales

1) Différents concepts

- La **cognition spatiale** englobe l'ensemble des processus et habiletés concernant l'espace
- La **représentation spatiale** est une construction mentale, partielle et personnelle d'informations spatiales
- La **mémoire spatiale** est la fonction mentale permettant le stockage de l'ensemble des informations spatiales

2) Représentation d'itinéraires :

- différentes sources d'informations allothétiques et idiothétiques ;
 - visuelles, verbales et physiques
- plusieurs systèmes de référence :
 - égocentrique versus allocentrique
- trois principaux types de connaissances :
 - repères, route et survol
- un système en développement
 - connaissances précoces vs. apprentissage graduel
 - connaissances des repères-type route-type survol
 - modèle remis en cause par des connaissances de type survol précoce
 - développement d'autres modèles
- des différences interindividuelles importantes :
 - expertise, habiletés visuo-spatiales et genre ?
- des bases biologiques ; rôle principal de l'hippocampe et de la latéralisation hémisphérique
- la réalité virtuelle, un outil d'avenir ?

En conclusion de ce chapitre, la cognition spatiale est un vaste domaine permettant entre autres de se représenter un environnement et donc de naviguer. Seules les capacités de représentations d'itinéraire seront abordées au cours de cette thèse.

Malgré leur rôle indispensable, les processus nous permettant de nous représenter l'espace ne sont pas matures lors de la naissance. Même si de nombreuses recherches ont mis en évidence des capacités précoces, celles-ci continuent à se développer jusqu'à un âge plus tardif. En ce qui concerne les représentations d'itinéraires, selon Siegel et White (1975) l'enfant acquiert d'abord des connaissances concernant les repères, puis des connaissances concernant la route et enfin des connaissances concernant la configuration générale en survol ; passant ainsi d'un point de vue purement égocentrique (centré sur soi) à un point de vue allocentrique (centré sur des éléments extérieurs à soi). Ces différentes connaissances et points de vue sont bien sûr utilisés par les adultes. Cette hypothèse de développement graduel est remise en cause par de nombreuses études chez les jeunes enfants, observant notamment des compétences précoces d'utilisation de connaissances de type survol. Chez l'adulte comme chez l'enfant, des différences interindividuelles existeraient, par exemple dans les stratégies utilisées ou dans les capacités visuo-spatiales. Cette grande variabilité interindividuelle au sein d'un même groupe d'âge est donc à prendre en considération afin de préciser le rôle des facteurs développementaux dans l'aptitude à se représenter un itinéraire.

Chapitre 2 : Le langage dans les représentations d'itinéraires

La capacité à communiquer des informations spatiales est présente dans de nombreuses espèces (Pallaud, 2001). Par exemple, les abeilles ont à leur disposition un système de communication (communément appelé « la danse des abeilles ») permettant de communiquer le type, l'emplacement et la quantité précise d'une source alimentaire (mis en évidence par von Frisch dans les années 1950's).

Chez l'Homme, la communication par le biais du langage nous permet de transmettre des informations spatiales afin d'aider d'autres personnes à naviguer dans un environnement même lorsque celui-ci leur est inconnu. Expliquer un itinéraire ou l'agencement d'objets entre eux est une tâche complexe faisant intervenir des capacités diverses. Une même configuration spatiale ou un même itinéraire peut donner lieu à des descriptions très variées qui diffèrent d'un individu à l'autre. Malgré cette variabilité, si une description est efficace, l'interlocuteur peut se représenter mentalement l'environnement et ainsi parvenir à son objectif. Cette capacité à transmettre des informations complexes se développe petit à petit chez l'enfant. Une question largement débattue dans la littérature est de savoir si - et dans quelle mesure - ce développement serait étroitement lié au développement cognitif et langagier.

Depuis une vingtaine d'années, des chercheurs se sont intéressés à la communication verbale d'informations spatiales diverses, comme l'explication de scènes visuelles ou d'itinéraires entre différents interlocuteurs. Nous examinerons les résultats de certaines de ces études chez l'enfant ou l'adulte, notamment en relation avec l'expression et la compréhension du discours spatial, en tenant compte du point de vue des interlocuteurs. Dans ce cas, la communication permet à l'interlocuteur de se représenter l'environnement sans en avoir une perception directe. Il peut ainsi construire une carte cognitive ou un modèle mental spatial de l'environnement en suivant les indications fournies par le locuteur. Cela peut ainsi lui permettre de naviguer ou de raisonner sur cet environnement. Notons que si le langage joue un rôle universel dans la construction des représentations spatiales, des recherches en psycholinguistique ont mis en évidence l'impact des propriétés spécifiques des langues sur l'acquisition du langage spatial, soulevant la question du rôle que joue le langage dans l'organisation de la cognition

spatiale (Hickmann, 2003). Plus généralement, cette question renvoie à l'approche proposée par Whorf au début du vingtième siècle et ravivée plus récemment (par exemple Slobin, 1996, 2004, 2006) selon laquelle les langues serviraient de « filtre », invitant l'enfant à prêter plus d'attention à certains aspects de la réalité qu'à d'autres et influençant ainsi la façon dont il sélectionne et organise les informations.

1. Le discours spatial

Le discours permet de communiquer verbalement des informations spatiales pouvant être utilisées lors de la navigation afin d'atteindre un objectif, tout en évitant des obstacles. Une utilisation appropriée du langage spatial dépend de la capacité du locuteur à traduire des informations linguistiques linéaires dans une représentation multidimensionnelle qui incorpore des relations topologiques entre entités (Denis, 1996). Le discours spatial suit des principes d'organisation qui s'appliquent à tout discours, mais comprend également des éléments spécifiques de la communication spatiale (Denis, 1997). Certaines informations concernent les repères, les orientations, les directions ou les distances. La structure des descriptions peut être spécifique suivant l'objectif de la communication. Ce type de discours requiert des capacités de planification qui jouent un rôle primordial dans l'efficacité des représentations verbales. Il sera question de «micro-planning», c'est-à-dire l'élaboration d'un objectif en une séquence d'objectifs secondaires et la sélection des informations permettant de réaliser ces objectifs. Le processus de production comprend une première étape préverbale d'organisation des informations en séquences. Cette étape est suivie de la formulation, c'est-à-dire de la transformation d'une structure conceptuelle en une structure linguistique. Au cours de cette étape, il est donc nécessaire d'accéder à un encodage linguistique, lexical et grammatical, donnant lieu à une certaine structure du discours, ainsi qu'au codage phonologique pour construire un programme articulatoire (Levelt, 1989, cité dans Denis, 1997).

1.1. Indications de repères, de mouvements et d'indices de configuration

Les descriptions spatiales comportent un ensemble d'informations spécifiques dont les repères, les mouvements et les indices de configurations.

Les repères sont mentionnés par des noms propres (par exemple, «Paris»), ou communs («la boulangerie»), ou des groupes de mots voire des propositions («la maison qui fait l'angle»)

permettant de situer un lieu ou une entité. La représentation d'une entité peut être liée à ses propriétés physiques ou à sa fonction. Malgré une grande diversité linguistique en matière d'espace, les langues du monde sont généralement très riches en éléments lexicaux spécifiant les entités, leurs localisations et leurs changements de localisations dans l'espace (Aurnague et al., 1997). Cependant, les référents spatiaux peuvent être définis différemment à partir de leurs propriétés ou selon le point de vue de la représentation. Par exemple, selon les besoins du discours dans une situation donnée, les noms peuvent être modulés par des adjectifs indiquant des caractéristiques physiques spécifiques ou fournissant des dimensions visuo-spatiales (longueur, largeur, hauteur, profondeur etc.).

Les expressions liées aux mouvements. Le langage spatial peut se référer à trois types de situations : des situations statiques (de localisation) ou dynamiques (de mouvement), ces dernières pouvant impliquer un mouvement effectué dans une même localisation («il court dans la cuisine») ou un mouvement impliquant un changement de localisation («il entre dans la cuisine»). L'indication qu'une situation est dynamique ou statique peut être précisée en français de différentes façons. Les verbes d'état (comme «être», «se trouver», «se situer») désignent des situations statiques. Les verbes de mouvement, quant à eux, indiquent un déplacement, soit sans autre précision («aller»), soit en précisant différents aspects de ce déplacement. Par exemple, il est possible de préciser les informations suivantes: une manière de déplacement («voler», «marcher», «courir») ; un changement de direction («tourner»); un franchissement de frontières («entrer», «traverser»); une trajectoire le long d'un axe vertical («monter», «descendre»); ou encore une relation causale impliquant un agent qui provoque le mouvement d'une autre entité («faire tomber», «monter la valise»).

Notons que les langues sont très variables dans la façon dont elles expriment ces informations. Selon Talmy (2000), dans certaines langues, dites «à cadrage verbal» («*verb-framed languages*»), la racine verbale exprime la trajectoire du mouvement. C'est le cas des langues romanes dont fait partie le français. En revanche, les langues dites «à cadrage satellitaire» («*satellite-framed languages*»), comme les langues germaniques comme l'anglais, réservent le verbe pour exprimer la manière du mouvement et expriment la trajectoire dans des satellites (comme des particules) en dehors du verbe. Ainsi, le locuteur francophone exprime rarement la manière du mouvement et lorsqu'il l'exprime pour les besoins du discours, il relègue cette composante dans des expressions périphériques au noyau verbal (« entrer en courant »). En revanche, les locuteurs anglophones expriment le plus souvent les deux types d'informations

conjointement, la manière étant centralement lexicalisée dans le verbe (« *to run into* »). Cette distinction caractérise les propriétés prototypiques des langues et n'exclue pas l'existence d'autres moyens d'exprimer le mouvement et la localisation dans une langue donnée. Elle a donné lieu à de nombreux travaux en linguistique et en psycholinguistique (Bowerman 1996, Bowerman & Choi 2003, Choi & Bowerman, 1991, Hickmann, 2003 ; Hickmann et al. 1996, 2008, 2009 ; Slobin, 1996, 2004, 2006). Ceux-ci montrent des différences frappantes, conformes à la typologie, dans les descriptions verbales produites dans différents types de langues par l'adulte et par l'enfant dès le plus jeune âge.

Les indices de configuration spatiale sont propres au langage ou partagés avec les informations cartographiques. Ils précisent des informations de distances, de lieux spécifiques et de directions ou orientations d'un élément ou entre des éléments. Ils ont un caractère statique lorsque les référents spatiaux, en mouvement ou non, sont considérés dans une position à un instant donné. Les positions sont très souvent désignées en français au moyen d'expressions spatiales de type prépositions ou adverbes. Les prépositions indiquent des informations suivant différents axes : axe horizontal ou latéral (« gauche »-« droite »), vertical (« en haut », « sous ») ou sagittal (« devant »-« derrière »), suivant des notions de proximité (« près-loin »), la présence ou non de contact (« sur », « au-dessus »). Généralement, la localisation porte sur deux entités, l'une étant localisée par rapport à l'autre, mais il existe des situations mettant en jeu plus de deux entités (Aurnague et al., 1997).

Certains points spécifiques sont définis par l'emplacement d'un repère ou par des échelles de coordonnées GPS comprenant une longitude et une latitude. Par exemple, l'Institut de psychologie de Boulogne-Billancourt se situe à l'intersection entre la latitude 48.834442 et la longitude 2.247796. Cette information est peu utilisée au quotidien même si elle fournit une indication très précise. Elle requiert l'utilisation de certains outils comme un GPS, dont l'utilisation est principalement destinée à des fins de géolocalisation scientifique ou technique (aéronautique) mais plus rarement au quotidien.

La direction à prendre ou l'orientation d'entités peuvent aussi être indiquées par des prépositions spatiales (« vers », « jusqu'à », « à gauche », « au bout » etc.) ou par des points cardinaux (suivant les axes Nord-Sud, Est-Ouest). Les directions peuvent être indiquées précisément grâce à un équivalent entre les points cardinaux et des angles de direction (Nord = 0° ou 360°, Sud = 180° donc Sud-sud-est correspond environ à 157°). Une boussole est alors nécessaire pour lire l'information fournie.

Les distances à parcourir entre deux repères peuvent être mentionnées par des prépositions spatiales («près», «au bout», etc.) mais également à l'aide d'échelles conventionnelles («3 mètres», «12 miles» etc.) ou encore suivant des notions temporelles («marcher pendant 10 minutes»). Notons que des termes tels que «près» sont des notions subjectives, dépendantes de l'ensemble des rapports entre les objets ou points de repères. La notion de distance peut ainsi être exprimée par des termes de proximité ou d'éloignement («à côté de») ou des termes géométriques («au milieu»). L'échelle de ces distances est inférée suivant les références en jeu. En effet, si l'on parle d'objets comme des clefs et un vase, les distances sont de l'ordre du centimètre (ou de quelques mètres), alors que si l'on parle de bâtiments, l'échelle est plutôt de l'ordre du mètre ou du kilomètre. Malgré cette subjectivité, il y a une préservation entre la distance réelle et l'indication prépositionnelle (Carlson & van Deman, 2004).

1.2. Changement de point de vue/de référentiel

Le point de vue utilisé par le locuteur est important et peut changer suivant l'individu et la situation. Le locuteur peut adopter différents points de vue au moment de l'identification des entités ou de l'expression des relations entre elles. En ce qui concerne les relations spatiales entre entités, Verjat (1994) considère qu'il y a deux approches de la localisation spatiale : l'approche «spatiale pure» qui s'intéresse aux réponses comportementales des sujets mais ne fait pas directement appel au langage et l'approche «spatio-linguistique» qui s'intéresse à la production et à la compréhension des marqueurs spatiaux. L'approche spatiale pure oppose le point de vue subjectif ou égocentré, c'est-à-dire centré sur le sujet, d'un point de vue exocentrique, objectif, allocentrique ou encore géocentrique qui dépend des indices extérieurs et qui est donc indépendant de la position du sujet (voir la Section 2.2 du chapitre 1-les systèmes de référence-). L'approche spatio-linguistique oppose un point de vue déictique à un point de vue non déictique (Figure 5).

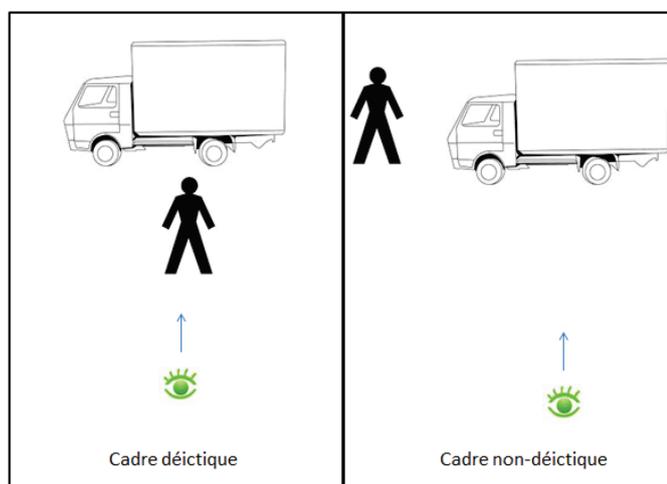


Figure 5 : Exemple de cadre déictique et non-déictique avec le camion comme élément de référence et le piéton comme cible (à positionner)

Un point de vue ou cadre déictique se rapporte au sujet, alors qu'un point de vue ou cadre non-déictique se rapporte aux propriétés de l'objet repère. Par exemple, dans un cadre déictique, «le piéton est devant le camion» indique que le piéton est situé entre le sujet et le camion, quelle que soit l'orientation du camion. En revanche, dans un cadre non-déictique, cette même phrase indique que le piéton est à l'avant du camion (c'est-à-dire devant la cabine du conducteur). Le choix entre ces deux cadres de référence est influencé par l'orientation intrinsèque ou non des objets repères ou cibles. Quand l'élément est orienté, comme un camion, les deux cadres de référence sont possibles. Notons que vers 3 ans, le cadre non-déictique est préféré et les prépositions spatiales de type «devant/derrière» interprétées selon ce point de vue, alors que l'interprétation selon le point de vue déictique est plus tardive. Lorsque le repère n'est pas orienté, un cadre déictique peut être choisi selon deux possibilités : la rotation (en miroir ou face à face) c'est-à-dire que «devant» indique que la cible sera entre le sujet et le repère; ou la translation (aligné ou en tandem) à l'inverse le repère est entre le sujet et la cible. La translation est surtout utilisée lors du mouvement. Lorsque le repère ou la cible ne sont pas orientés, il est parfois possible d'utiliser l'orientation de l'environnement. Par exemple, afin de situer un piéton par rapport à une balle et un cube (entités non orientées), l'enfant peut considérer la salle de classe qui possède une orientation du fait de la présence d'un tableau. Ici encore, il s'agit donc plutôt d'une approche non-déictique. Graboski et Weiss (1996) ont réalisé une expérience interlangues afin de mieux comprendre les choix de points de vue déictique ou intrinsèque chez des sujets adultes. Ils ont examiné l'impact de plusieurs facteurs sur les interprétations d'expressions spatiales («devant-derrrière», «avant-après») en allemand, en néerlandais, en français, en italien et en anglais : l'orientation ou non de l'objet de référence, la préposition -spatiale ou temporelle-, la

situation sociale du discours -formelle ou informelle- et les caractéristiques du langage. Ils observent que les caractéristiques sociales et celles de la langue ont le plus d'influence sur le choix du point de vue. Selon la langue, les ambiguïtés entre points de vue ne s'observent pas dans les mêmes conditions. Par exemple, l'ambiguïté est faible en français et en italien lorsque l'objet de référence est non orienté. À l'inverse, elle est surtout influencée par la situation sociale en allemand et en néerlandais.

Ces dichotomies égo-allocentrisme ou déictique-non-déictique sont souvent discutées car certaines situations sont plutôt intermédiaires (Verjat, 1994). En anglais, par exemple, «*above*» («au-dessus de» ou «en haut») peut être basé sur une approche déictique (extrinsèque ou allocentrique) ou intrinsèque (centrée sur l'objet) même si le point de vue allocentrique est le plus utilisé (Carlson-Radvansky & Irwin, 1993).

2. Interaction entre langage et cognition spatiale

La relation entre langage et cognition reste l'une des plus grandes questions débattue dans les sciences cognitives. Cette question soulève encore des débats qui ont été ravivés dans les deux dernières décennies par des recherches inter-langues montrant des différences dans les performances des sujets, adultes et enfants, qui sont conformes aux propriétés de leurs langues (voir Graboski & Weiss, 1996 ; Bowerman, 1996 ; Slobin, 2006 ; Soroli, Hickmann & Sahraoui, 2011). Néanmoins, certains résultats ont été contestés par des travaux soulignant que ces différences inter-langues n'étaient que superficielles, car elles étaient uniquement liées à des situations verbales, et non attestée dans des situations impliquant la cognition non verbale (Gennari, Sloman, Malt & Fitch, 2002; Papafragou, Massey & Gleitman, 2002 ; Papafragou, Hulbert & Truswell, 2008; Papafragou & Selimis, 2010). Il se trouve que le domaine de l'espace est celui qui a suscité le plus de travaux visant à mettre en évidence le rôle du langage (en général) et des langues (en particulier) dans les représentations internes des sujets.

2.1. Informations verbales et performances spatiales

Certaines recherches mettent en lien la production verbale, la configuration de l'espace et les performances cognitives liées à l'espace. Par exemple, Hayward et Tarr (1995) ont étudié la structure de l'espace encodé verbalement, c'est-à-dire la description de relations spatiales entre deux objets à l'aide de prépositions spatiales. Ils observent que celle-ci est déterminée par la

structure des relations spatiales d'une représentation visuelle. Plus la relation entre les objets est axiale (ici, verticale ou horizontale), plus cette relation est facilement nommée et positionnée. Il y aurait donc un lien entre production verbale et représentation spatiale. D'un point de vue développemental, Hermer-Vazquez, Moffet et Munkholm (2001) évaluent les mécanismes de réorientation chez l'enfant (3-7 ans). Ils observent que la production de phrases est le meilleur indicateur des performances de réorientation. Elle corrèle également avec la flexibilité c'est-à-dire la capacité à utiliser différents indices (géométriques et repères) dans la recherche d'objets. Selon les auteurs, la production langagière joue donc un rôle causal dans la capacité à construire de nouvelles représentations spatiales rapidement. Ratliff et Newcombe (2008) pensent que ce type d'observation est dû aux capacités de flexibilité. Le langage ne serait pas nécessaire pour utiliser avec succès les caractéristiques géométriques permettant une réorientation. Shusterman, Lee et Spelke (2011) étudient également l'influence du langage sur la réorientation d'enfants de 4 ans à partir d'une épreuve de recherche de cible dans une pièce rectangulaire comprenant un mur rouge et trois d'une couleur neutre. Les auteurs montrent que la recherche de cible est améliorée lorsque l'expérimentateur désigne l'objet dans une phrase avant la désorientation (tourner sur soi-même les yeux clos). L'objet était alors désigné par une phrase contenant une expression spatiale («Je cache le sticker sur le mur rouge») ou entièrement non-spatiale («le mur rouge peut t'aider à trouver le sticker»). À l'inverse, lorsque l'expression verbale n'est pas pertinente («regarde ce joli mur rouge»), elle ne facilite pas la recherche de l'objet. Cette étude permet donc d'observer que l'influence du langage sur le comportement des enfants dépend de son contenu, notamment de la désignation d'un repère pertinent pour encoder un emplacement. Denis et Cocude (1992) observent que la structure d'une description d'un environnement (une île) bien organisée (éléments présentés dans le sens de l'aiguille d'une montre) ou mal structurée (phrases dans un ordre aléatoire) affecte la structure intrinsèque de l'image des objets et les opérations mentales associées à cette image. Ils observent notamment que les repères sont moins bien placés lors d'une organisation aléatoire.

2.2. Différences inter-langues

Les comparaisons inter-langues constituent une autre façon d'aborder la question de la relation entre langage et cognition puisqu'elles permettent de confronter différentes approches théoriques. Par exemple, de telles comparaisons permettent, soit de généraliser des conclusions concernant le développement (indépendamment de la langue), soit au contraire d'invalider de telles généralisations en montrant l'impact des propriétés spécifiques des langues sur le

fonctionnement cognitif (si des différences significatives devaient être attestées). Si cette approche translinguistique n'est pas au centre de cette thèse, elle mérite néanmoins d'être mentionnée brièvement par le biais de quelques études illustrant son utilité. Par exemple, Majid, Bowerman, Kita, Haun & Levinson (2004) discutent de l'influence ou non du langage sur la cognition spatiale par la comparaison des systèmes de référence ou points de vue adoptés sur différentes configurations spatiales selon les langues. Ils comparent trois systèmes de référence : relatif (égocentré), intrinsèque (centré sur l'objet) et absolu (allocentrique, utilisation de positions/ angles; «Nord»). Afin de décrire la configuration d'une cuillère et d'une fourchette, en anglais, les points de vue intrinsèque («la fourchette est devant la cuillère») ou relatif («la fourchette est à gauche de la cuillère») peuvent être utilisés, alors que le système absolu n'est pas utilisé lors de descriptions à petite échelle; au contraire, en Guugu Yimithirr (langue parlée en Australie), le système absolu («la fourchette est au nord de la cuillère») est utilisé, alors que les systèmes relatif ou intrinsèque n'existent pas dans cette langue. Notons qu'aucune langue ne présente un système relatif sans système intrinsèque (mais quelques unes présentent un système intrinsèque sans le relatif). Un même système, comme le système intrinsèque, peut être basé sur des informations différentes; par exemple, en tzeltal (langue parlée au Mexique), il se base sur des propriétés géométriques notamment le volume, alors qu'en anglais il se base plutôt sur l'orientation/la forme ou la fonction de l'objet («le devant d'une maison est la façade de l'entrée principale»). Même lorsque les tâches ne font pas appel au langage (tâches visuo-spatiales), les participants les résolvent en utilisant les systèmes de référence de leur langue (Majid et al., 2004). De tels résultats soulèvent la question de l'influence de la culture sur le choix du point de vue adopté. En effet, les cultures vivant principalement en milieu urbain (ex. indo-européenne) utilisent plutôt un système relatif, alors que les cultures vivant principalement en milieu rural (ex. aborigène) utilisent plutôt un système absolu, même si certaines utilisent le système relatif (ex. Yukatek au Mexique). Par ailleurs, l'âge d'acquisition des systèmes relatif ou absolu de représentation diffère suivant que le système des langues est unique ou dominant. Le vocabulaire spatial (absolu ou relatif selon la langue) est acquis progressivement jusqu'à environ 8 ans pour les langues dont le système absolu est dominant et jusqu'à 12 ans pour celles dont le système relatif est dominant. L'acquisition semble donc légèrement plus précoce pour les langues de système absolu (Majid et al., 2004).

Ces quelques exemples d'études montrent un lien potentiel entre le langage et la cognition spatiale, indiquant que le langage influencerait certaines performances spatiales, ainsi que le point de vue utilisé, et ce chez l'adulte comme chez l'enfant, y compris lors de la réalisation d'épreuves purement visuo-spatiales. Néanmoins, cette question continue d'alimenter

un débat encore ouvert (Levinson et al., 2002; Spelke, 1998; Landau, 2002). Par exemple, Munnich, Landau et Doshier, (2001) compare la dénomination de localisations spatiales et les performances à un test de mémorisation spatiale de ces mêmes localisations dans trois langues (anglais versus japonais et coréen). La localisation spatiale étudiée implique une organisation axiale (GAUCHE-DROITE) et de contact (SUR versus AU-DESSUS). Ces langues ont un système de dénomination axial équivalent mais différent pour le contact. Malgré tout, les performances de mémorisation des localisations spatiales sont équivalentes, montrant que le langage spatial et la mémoire spatiale engageraient les mêmes propriétés spatiales même si les systèmes sont partiellement indépendants. Ainsi, les différences linguistiques ne provoquent pas obligatoirement des différences d'encodage non verbal des localisations spatiales.

3. Le développement du langage spatial chez l'enfant

De nombreux travaux antérieurs ont étudié le développement du langage spatial chez l'enfant, parmi lesquels certains ont abordé les débats concernant le rôle du langage dans le développement des compétences spatiales. Alors que de nombreux travaux conçoivent les capacités spatiales verbales et non verbales comme étant relativement indépendantes (par exemple, Landau, 2002), d'autres considèrent que le développement des compétences spatiales est lié à l'acquisition par l'enfant des moyens linguistiques pour représenter l'espace verbalement et pour organiser le discours spatial (Slobin, 2006). De façon surprenante, malgré les études développementales disponibles dans le domaine de l'espace, et alors que de nombreux travaux existent chez l'adulte, très peu de recherches ont été dévolues à la capacité des jeunes enfants à construire des modèles mentaux spatiaux, en particulier en relation avec les descriptions d'itinéraires qui impliquent la production d'un discours spatial étendu (Lloyd, 1991; Weissenborn, 1986), même si les recherches sur d'autres types de discours étendus sont pertinentes, différents travaux ont été conduits sur la production de récits impliquant des localisations et des déplacements dans l'espace (Hickmann, 2003), de descriptions de pièces dans un appartement (Ehrich, 1982; Ehrich & Koster, 1983), de descriptions de déplacements spontanés ou de mouvements provoqués (Choi & Bowerman, 1991 ; Hickmann, 2006; Hickmann , Hendriks & Champaud, 2008 ; Slobin, 2006), le raisonnement en relation avec des scènes spatiales (Piaget & Inhelder, 1948). La plupart confortent les résultats obtenus dans des études expérimentales sur l'acquisition des marqueurs de relations spatiales (Bowerman, 1996; Hickmann, 2007; Hickmann & Hendriks, 2006; Johnston, 1985, 1988). Dans toutes ces situations, des progrès clairs sont rapportés, principalement dans le langage spatial employé par

les enfants, par exemple leur utilisation de prépositions spatiales, de verbes de mouvement, et d'expressions nominales pour se référer à des repères à différents moments du discours.

3.1. Organisation du discours spatial

L'enfant doit apprendre à organiser l'information spatiale à deux niveaux (Hickmann, 1998, 2003) : au sein d'un énoncé (niveau phrastique) et entre les énoncés du discours (niveau discursif). La cohésion du discours dépend de l'utilisation de marqueurs discursifs divers permettant «d'ancrer» les informations dans le discours en l'absence de connaissances partagées. Par exemple, en ce qui concerne la référence aux entités, le locuteur doit marquer le statut de l'information au moyen des procédures disponibles dans sa langue pour introduire des entités dites «nouvelles», dont l'interlocuteur ne connaît pas l'existence et l'identité, ainsi que pour maintenir la référence à des entités déjà introduites et partagées par les interlocuteurs (information «ancienne») (voir des synthèses dans Hickmann, 2000, 2003). Dans beaucoup de langues, l'introduction d'entités nouvelles est réalisée par l'utilisation de déterminants indéfinis, alors que les déterminants définis sont utilisés pour le rappel d'entités préalablement mentionnées ou connues de tous par ailleurs. Des pronoms («il, elle») ou éléments zéro («il est arrivé et 0 s'est assis») peuvent également être utilisés pour maintenir la référence à des entités anciennes. Cette capacité à marquer le statut de l'information se développe relativement tardivement. Par exemple, des études (Hickmann et al., 1995; Kail & Hickmann, 1992) ont comparé des récits produits par des enfants de 6, 9 et 11 ans à partir d'un support imagé dans deux conditions : en l'absence de connaissances partagées (ACP) vs lorsque les interlocuteurs regardaient les images ensemble (connaissances partagées ou CP). Si les enfants utilisent dès 6 ans plus de formes indéfinies pour introduire les référents en condition ACP qu'en condition CP, ce n'est qu'à partir de 9 ans qu'ils adaptent systématiquement leur discours en fonction des connaissances mutuelles. Des analyses de récits produits dans plusieurs langues (français, anglais, allemand) montre aussi que l'utilisation de déterminants indéfinis est faible avant 6 ans et augmente entre 7 et 10 ans, puis jusqu'à l'âge adulte (Hickmann et al., 1998 ; Hickmann, 2003). On observe donc un développement progressif de la capacité à créer un ancrage dans le récit.

L'ancrage de la référence peut inclure des entités servant de repères (souvent des référents inanimés) pour interpréter les localisations et les changements de localisation,

constituant donc des entités spatiales essentielles dans l'organisation discursive. Les analyses concernant ces référents (Hickmann, 2003) montrent également un développement frappant et encore plus tardif que pour les autres entités : dans toutes les langues étudiées (français, anglais, allemand, chinois), ce n'est qu'à l'âge adulte que l'ancrage spatial est effectué de façon suffisante pour les besoins du discours. Les enfants de 10 ans commencent à planifier le discours de façon à utiliser des expressions appropriées pour introduire ces référents et pour continuer à s'y référer dans le discours ultérieur (par ex., «Il y a un arbre avec un nid... le chat monte à l'arbre...»). En revanche, les enfants de 7 ans mentionnent ces entités spatiales mais ne les introduisent pas («Le chat monte à l'arbre», sans aucune introduction préalable de l'entité «arbre» dans le discours précédent). Enfin, les plus jeunes enfants (4-5 ans) présupposent simplement l'existence des entités spatiales nécessaires à l'interprétation du discours, s'appuyant sur des présupposés implicites, tel le fait que les nids d'oiseaux sont souvent situés dans des arbres (par exemple, «le chat monte» sans préciser où).

Toutefois, ici encore, des variations sont observées en fonction des langues, que nous décrivons brièvement ci-après, d'abord pour l'expression du mouvement, puis pour celle des relations spatiales. Comme nous l'avons vu ci-dessus (voir Section 2.2 de ce chapitre, «Différences inter-langue»), les travaux développementaux (par ex. Bowerman, 1996; Choi & Bowerman, 1991; Hickmann, 2003; voir aussi Majid *et al.*, 2004 sur les cadres de référence) montrent deux types de résultats : 1) des développements récurrents dans toutes les langues étudiées, montrant une augmentation de la capacité à fournir des informations précises et complètes concernant l'espace - capacités vraisemblablement universelles et indépendantes des propriétés variables des langues : 2) mais également, des différences inter-langues à tous les âges, y compris chez les jeunes enfants, montrant l'impact de la diversité des langues sur le parcours du développement.

3.2. Expression du mouvement

En ce qui concerne l'expression du mouvement, on observe des différences inter-langues dans la production et la compréhension du mouvement dès l'émergence du langage (Bowerman & Choi, 2003; Choi & Bowerman, 1991; Hickmann *et al.*, 2008; Hickmann, Taranne & Bonnet, 2009). Des études sur les productions entre 4 ans et l'âge adulte montrent également ces différences dans des périodes plus tardives (Hickmann *et al.*, 2009). Ainsi, quel que soit l'âge, dans certaines langues (à cadrage verbal, comme en français), les locuteurs expriment moins souvent la manière du mouvement que dans d'autres langues (à cadrage satellitaire, comme

l'anglais). De façon plus générale, à tous les âges (dès 4 ans et jusqu'à l'âge adulte), les prédicats dynamiques sont nettement plus variés et riches en anglais qu'en français (types d'informations exprimées, nombre d'informations sélectionnées et nombre de distinctions, par ex. manière + direction + source + but «run up from... to...», ou diversification dans les types de manières «run, jump, hop...»). De plus, des comparaisons inter-langues entre différents types de mouvements montrent que 1) pour tous les mouvements et les âges, les sujets francophones mentionnent le plus souvent uniquement la trajectoire (à tous les âges) ou parfois uniquement la manière (chez les jeunes enfants avec les mouvements de type «traverser»), ce qui résulte en une densité sémantique significativement moins élevée que dans toutes les autres langues : mais que 2) le nombre d'informations exprimées augmente aussi de façon significative avec l'âge dans toutes les langues, mais plus particulièrement en français. Par ailleurs, dans la plupart de ces études, on observe que les enfants de 4-5 ans mentionnent plus de prédicats statiques que les autres. Néanmoins, ces prédicats sont plus fréquents en français que dans les autres langues chez les enfants, montrant un souci d'exprimer les entités et leurs localisations dans l'ancrage du récit. Selon certains auteurs (Slobin, 2006), ce résultat est également conforme aux propriétés du français, par comparaison à celles des langues à cadrage satellitaire, dans lesquelles le mouvement est exprimé de façon beaucoup plus compacte, nécessitant donc moins d'ancrage préalable.

3.3. Expression des relations spatiales

Nous avons vu précédemment le rôle que peuvent jouer les indices de relations spatiales dans le discours. Selon certains auteurs, et malgré des controverses récentes (voir ci-dessous), l'acquisition des prépositions spatiales est un long processus qui se développe étape par étape, d'abord en compréhension puis en production, depuis l'émergence du langage et jusqu'à 8-10 ans (Bowerman & Choi, 2003; Johnston, 1988; Piérart, 1978; Hickmann & Hendriks, 2006; Hickmann et al., 2008; Piérart, 1977). La géométrie de l'espace est définie selon différents axes (vertical, horizontal et sagittal). L'axe vertical est défini selon les dimensions «haut-bas» c'est-à-dire selon l'axe de gravité et les autres axes selon les dimensions asymétriques «devant-derrrière» (axe sagittal) et symétriques «gauche-droite» (axe horizontal). En français, comme dans d'autres langues (voir Johnston & Slobin, 1979; Johnston, 1988), les marqueurs de relations spatiales sur l'axe vertical sont acquis précocement. Vers 3 ans, les enfants acquièrent d'abord les prépositions «sur», puis «sous». Toutefois, ils ne différencient «sur» de «au-dessus de» que vers 6 ans, la notion de séparation étant acquise plus tardivement que celle de contact (Piérart, 1978).

L'acquisition des prépositions concernant l'axe sagittal se fait en plusieurs étapes. Les enfants comprennent la préposition « derrière » vers 3 ans, mais ils ne comprennent « devant » que vers 5 ans. L'acquisition des prépositions « devant » et « derrière » ne s'opère que progressivement, jusqu'à 8 ans (Piérart, 1977). A trois ans, 75% des enfants comprennent correctement « derrière » lorsque le référent est intrinsèquement orienté (par ex. « derrière la voiture » vs. « derrière le ballon ») mais ce taux n'est atteint qu'à 5 ans concernant « devant » (les enfants ont tendance à intervertir « derrière » et « devant »). La production correcte de ces termes n'est présente que vers 8 ans. La notion de « devant » serait comprise en fonction de celle de « derrière », par réciprocité. Les relations « devant » et « derrière » sont souvent décrites avec les termes exprimant le « voisinage » (« à côté de », « près de »), surtout jusqu'à 4 ans ½. Les inversions de référents sont également fréquentes notamment pour « devant » (surtout jusqu' à 5 ans). Notons qu'hormis l'orientation intrinsèque des entités, d'autres caractéristiques de l'objet influencent la compréhension et la production des prépositions spatiales. En particulier, « derrière » est plus facilement compris lorsque l'objet est opaque, et il est dans ces cas interprété comme signifiant « caché ». Le choix de l'axe projectif, telle la ligne du regard, n'est acquise pour l'ensemble des objets (quelles que soient leurs caractéristiques) qu'à 8 ans.

Une autre étude (Piérart, 1976) a également examiné la production et la compréhension des marqueurs de configurations spatiales « dans » et « autour de » chez des enfants de langue française de 3 à 7 ans. A trois ans, plus de 75% des enfants comprennent « dans » et « autour de » mais ils ont des difficultés à représenter « autour de » par un graphique (la moitié des enfants y arrivent vers 4 ans ½). En production, la préposition « dans » marquant la relation de contenance (« dans l'armoire ») est acquise à 3 ans, mais l'acquisition de « autour » est légèrement plus tardive (70 % à 3 ans ½ mais plus de 75% des enfants à 5 ans). Jusqu'à 4 ans ½, les marques de voisinage « à côté de » ou « près de » peuvent être utilisées par erreur ou par manque de précision à la place de « dans ». Jusqu'à 6 ans, quelques erreurs d'inversion de référents sont également observées (« La chaise est autour du rond »).

Les prépositions spatiales sont donc acquises très graduellement et la séquence développementale observée serait identique chez les enfants avec retard mental, même si elle évolue plus tardivement dans cette population (Piérart, 1998). Elle serait également observée dans de nombreuses langues, indiquant le rôle de facteurs cognitifs vraisemblablement universaux, malgré des différences dans la chronologie des acquisitions : l'ordre d'acquisition est le même dans toutes les langues, même si l'âge d'acquisition est plus ou moins tardif selon la langue (voir les travaux princeps de Johnston & Slobin, 1979).

Toutefois, rappelons (voir Chapitre 1), que des résultats plus récents chez le très jeune enfant ont remis en question ces résultats, en indiquant l'existence de connaissances précoces très précises concernant les relations spatiales, par exemple du type AU-DESSUS/EN-DESSOUS (Quinn, 2002; Casasola & Park, 2013) et, de façon plus générale, dans différents domaines de la cognition (par exemple, Baillargeon, 2002; Wynn, 1992; Spelke, 1998). De façon plus générale, les travaux sur les premiers mois de la vie ont ouvert des débats confrontant différentes conceptions de l'ontogenèse, sur lesquelles nous reviendrons plus loin dans la discussion. Ces débats soulèvent nombre de questions méthodologiques et théoriques, qui dépassent le cadre de cette thèse. Par exemple, au vu de la grande diversité des tâches et/ou des paradigmes expérimentaux utilisés, les résultats indiquant l'existence de connaissances précoces versus tardives mettent vraisemblablement en œuvre des fonctions mentales de différents types et de différents niveaux (discrimination au niveau de la perception vs. concepts plus abstraits, voir une revue de questions dans Hickmann, 2003).

4. Les descriptions verbales d'itinéraires

La description d'itinéraires constitue un type particulier de langage spatial. Ces descriptions font preuve d'une grande diversité (Denis, Pazzaglia, Cornoldi & Bertolo, 1999), par exemple selon leur mode d'expression (descriptions orales ou écrites), le caractère plus ou moins formel du discours et les besoins précis de la communication (une explication permettant à des invités d'arriver à une soirée ou des explications dans un guide touristique).

4.1. Transmission d'informations spatiales spécifiques

Un itinéraire peut être communiqué par une description verbale qui nécessite l'expression de différents types d'informations, par exemple un point de départ, un objectif final, des repères (localisations statiques, entités), des actions à effectuer (informations de type «procédural»), ainsi que, lorsque cela est nécessaire, des étapes intermédiaires comportant des objectifs secondaires. Afin d'organiser les informations dans la communication, il est nécessaire de les présenter de façon linéaire dans le discours, par exemple dans leur ordre d'apparition, suivant le mouvement présumé de l'individu. Cette linéarisation du discours suit une séquence de points connectés entre eux par des segments d'orientation. Une description commence généralement par l'indication de la position initiale, c'est-à-dire du point de départ. Ce

positionnement doit le plus souvent être accompagné d'indications sur l'orientation de l'interlocuteur suivant des repères, par exemple «pour commencer, tu es dos à la mairie». En l'absence de cette précision, l'interlocuteur risque de partir dans une direction totalement différente de celle souhaitée. Suite à ces précisions concernant le positionnement et l'orientation, une première action est proposée afin d'aller vers la première étape, par exemple « Tu pars à droite, jusqu'au premier carrefour ». Cette indication peut être accompagnée d'une annonce de repères visibles du point de départ, confirmant la première étape ou servant d'objectif de cette première étape ou encore informant d'un objectif plus lointain lorsqu'il y a des repères distants. Une fois arrivé au repère de décision de la première étape, des indications de réorientation peuvent être prescrites. Un autre repère ou objectif peut être proposé pour indiquer la direction initiale de cette deuxième étape par exemple. Cette procédure peut être poursuivie jusqu'à l'étape finale. Des informations de vérification peuvent être utilisées tout au long de la procédure.

Selon Michel Denis (1997), trois principales opérations cognitives sont impliquées dans les descriptions d'itinéraires:

- L'activation d'une représentation interne d'un environnement dans lequel le déplacement doit être effectué (étape 1)
- La planification de l'itinéraire (étape 2)
- La formulation de la procédure (étape 3)

Etape 1. Une représentation interne d'un environnement peut être considérée comme un modèle mental de l'environnement ou plus simplement une carte mentale, comme nous l'avons vu précédemment. Elle inclut principalement des aspects verbaux, comme les noms de rues, et non-verbaux, notamment visuo-spatiaux, comme des images mentales de scènes. Une telle représentation mentale implique également une composante procédurale (Dixon, 1987), c'est-à-dire une connaissance des mouvements effectués par l'individu. L'activation de la représentation est généralement centrée sur une perspective égocentrique même si des informations allocentriques peuvent être activées. Les capacités d'imagerie mentale favorisent cette activation.

Etape 2. La planification de l'itinéraire correspond à la création d'une séquence de segments, qui relie un point de départ à une destination finale, devant être suivie par un individu en mouvement. Cette succession de segments correspond à la succession d'actions

devant être réalisées. C'est donc une sélection des éléments et des actions nécessaires à la réalisation de l'itinéraire souhaité (par exemple l'itinéraire le plus court, le plus joli ou le plus simple). Toutes les informations comprises dans la représentation mentale ne doivent donc pas être communiquées.

Etape 3. Formuler la procédure que l'interlocuteur doit exécuter pour atteindre sa destination correspond à la dernière étape. Il ne s'agit pas de produire une description exhaustive de toutes les scènes visuelles successives de l'itinéraire, mais un nombre de phrases basées sur la décomposition de l'itinéraire en segments reliant les différents points de réorientation entre le point de départ et le point d'arrivée. La mention des repères rencontrés au cours du chemin et des actions à effectuer sur ce chemin est «dans» importante. Il est indispensable d'effectuer une sélection pertinente des repères parmi l'ensemble des entités rencontrées (ex. : bâtiments, panneaux) en fonction de leur valeur informative par rapport aux actions à exécuter et au besoin de se réorienter.

Rappelons qu'un repère est un élément (typiquement une entité ou un lieu) généralement saillant (Golledge et al., 1985; Presson & Montello, 1988) et culturellement reconnu (Lynch, 1960; Appleyard, 1969). Il permet de signaler l'emplacement d'une action, de situer d'autres repères ou de confirmer un chemin. A partir d'une description verbale, la représentation de l'emplacement d'un repère ne correspond pas un point précis mais plutôt à une région qui peut devenir de plus en plus précise lorsque l'on se familiarise avec l'environnement (Denis et al., 1995). Les actions, quant à elles, peuvent indiquer un changement de direction souvent accompagné de repères et de directions, par exemple « tourner à gauche à la librairie ». Elles peuvent également correspondre à une démarche n'impliquant aucun changement de direction, par exemple « marcher » ou « continuer tout droit ». Cette prescription d'actions induit donc un discours de type procédural (Dixon, 1987). Ces actions procédurales pourront être accompagnées de mentions de repères 2D, comme « le chemin », « la rue piétonne » ou « la place ». Les actions mentionnées peuvent également permettre de se positionner ou d'inspecter l'environnement, c'est-à-dire vérifier un emplacement ou une direction à partir d'une vue locale de scène visuelle, par exemple « lorsque tu arriveras au croisement, tu verras une fontaine sur la gauche ». Les actions et repères sont précisés et reliés entre eux par d'autres éléments spécifiques à la description d'itinéraires, notamment les relations topologiques. Celles-ci peuvent expliciter l'emplacement du navigateur en fonction de repères (« sur ta gauche, il y aura une

école») ou expliciter des relations entre repères («à droite de la boulangerie, il y a une librairie»). Comme nous l'avons vu précédemment (point 1.1 de ce chapitre 2), afin d'indiquer des relations topologiques en français, nous utilisons principalement des expressions plus ou moins complexes de type prépositions spatiales comme «sur», «devant» ou «à droite» propres au langage spatial. Au cours de descriptions d'itinéraires, il peut également y avoir des descriptions de propriétés ou de caractéristiques des repères («une vieille maison de pêcheur»).

Ainsi, Denis (1997), propose une classification des items produits au cours d'une description verbale en cinq catégories:

- Les prescriptions d'actions sans référence à un repère («tourner à droite»)
- Les prescriptions d'actions avec référence à un repère («aller jusqu'à la boulangerie»)
- Les références aux repères sans mention d'une action associée («il y a un cinéma»)
- Les descriptions de repères («le magasin est rouge»)
- Les commentaires («Bonne route»)

Cette classification de la description d'itinéraire met en avant les repères, les actions et les liens entre eux.

4.2. Description verbale et représentation mentale

Une description d'itinéraire ne peut transmettre qu'une partie seulement de la connaissance spatiale qu'a le locuteur d'un environnement. C'est une représentation partielle sélectionnée par le locuteur afin de permettre à l'interlocuteur d'arriver jusqu'à un objectif précis. La qualité de la structure d'une description d'itinéraire peut influencer la représentation que l'on construit d'un environnement (Denis & Cocude, 1992). Ainsi, elle peut affecter la structure interne de l'image, notamment sa structure métrique (Denis et al, 1995). Si elle est efficace, une description permet au destinataire de se représenter mentalement un environnement qu'il ne connaît pas et de réaliser une navigation (réelle ou imaginaire), à partir d'un point de départ, jusqu'à un point d'arrivée. Elle lui permet de construire une carte mentale de l'environnement, c'est-à-dire une image mentale pouvant avoir des propriétés métriques (de

distances) similaires à une représentation créée par la perception (Denis, Gonc'alves & Memmi, 1995).

Certains résultats montrent que les performances de vérification de phrases (verbatim et inférences) et de tracé de plan sont comparables, suite à l'apprentissage d'un environnement par une description de type route ou de type survol par comparaison avec une carte (Taylor & Tversky, 1992). Toutefois, lors de l'apprentissage par une description verbale, les inférences sont moins bien réussies lorsqu'elles impliquent un changement de perspective (ex. apprentissage route, inférences en survol).

Dans les études d'Avraamides, Galati, Pazzaglia, Meneghetti et Denis (2013), des adultes ont appris un environnement par le biais d'une première description verbale, puis d'une seconde description du même environnement dans laquelle le protagoniste change de point de vue. Les participants devaient alors seulement s'imaginer changer de position ou changer physiquement de position. Ils devaient ensuite s'orienter ou désigner des éléments qui leur étaient proposés. Avec un changement de point de vue physique (par rotation), les performances des participants dépendent de la représentation initiale créée au cours de l'encodage et non de la mise à jour. Le fait de réaliser un mouvement concordant avec la rotation ne facilite pas cette mise à jour. La mise à jour des relations spatiales provenant de descriptions est donc différente de celle provenant de la perception. Cependant, certains résultats suggèrent qu'une description de type survol permet une représentation plus flexible (meilleures performances de vérification de phases non convergentes) qu'une description de type route (Brunyé, Rapp & Taylor, 2008). L'accompagnement par une carte lors de la description de type route permet également une augmentation de la flexibilité de la représentation, c'est-à-dire la capacité à changer de point de vue facilement, mais elle conduit à une diminution de la flexibilité pour une représentation en survol.

4.3. Une description efficace

Denis et collaborateurs, ont mis au point une méthodologie pour étudier les descriptions spatiales d'itinéraires. Celle-ci consiste à élaborer une description « squelette » qui comprend l'essentiel de la navigation en un minimum de phrases. Afin de construire une telle description squelette, on recueille d'abord un ensemble de descriptions d'un même itinéraire auprès de nombreux participants pour aboutir à une « méga-description ». Un groupe de juges sélectionne ensuite les informations qu'ils évaluent comme étant importantes. Les items sélectionnés par au

minimum 80% des juges sont conservés et compilés afin de créer la description squelette. La sélection des informations importantes est la même entre une personne qui connaît ou non l'environnement, c'est-à-dire que la capacité à juger de la pertinence des informations ne dépend pas de la connaissance préalable de l'environnement (Denis et al., 1999). Une fois disponible pour un itinéraire donné, la description squelette sert à juger de la qualité de descriptions fournies par d'autres sujets pour ce même itinéraire : la qualité d'une description dépend de sa similarité avec la description squelette (Denis, 1997).

Daniel, Tom, Manghi et Denis (2003) ont présenté à des participants trois types de descriptions pour comparer leur efficacité lors de la navigation : une description jugée bonne, une jugée mauvaise et une description squelette. Une bonne description et une description squelette permettent une meilleure navigation qu'une mauvaise description : les participants s'arrêtent deux à trois fois moins, font deux fois moins d'erreurs (Daniel et al., 2003). Ces mêmes résultats ont été observés dans l'étude de Denis et al., (1999), comparant des personnes qui connaissaient un environnement à des étrangers ne le connaissant pas. L'efficacité de la description dépend notamment de l'habileté à connecter les actions aux repères (Daniel et al., 2003). Lorsqu'il est demandé à des individus ou à un petit groupe de personnes de réaliser une description d'itinéraire concise, les actions prescrites, notamment celles comprenant des repères, sont les éléments les plus conservés, alors qu'au contraire, les repères ne comprenant pas d'actions et les détails concernant les repères sont en grande partie supprimés (Daniel & Denis, 2004). La réduction des informations touche peu les repères décisionnels. Dans cette étude, il est également noté que les descriptions rédigées collectivement sont plus concises que les descriptions individuelles. Elles comportent principalement des actions avec repères mais moins de repères seuls que les descriptions individuelles. La description collective est concise, centrée sur les actions prescrites et les repères décisionnels, se rapprochant d'une description squelette efficace.

Selon Padgitt et Hund (2012), les détails d'un point de vue route (repères, gauche-droite) sont considérés comme plus efficaces que les détails d'un point de vue survol (distance, informations cardinales). En effet, les informations de type route permettraient aux participants de faire moins d'erreurs au cours de la navigation dans un environnement. Les descriptions avec plus de détails différents (informations cardinales, distances, repères etc.) sont également considérées comme plus efficaces (Hund & Padgitt, 2010 ; Padgitt & Hund, 2012). Les descriptions de type route comprennent des repères visuels et des noms de rues. Tom et Denis (2003) précisent que les locuteurs mentionnent spontanément plus de repères que de rues. De plus, les descriptions comprenant uniquement des repères sont plus efficaces que celles qui

comprennent uniquement des noms de rue. En effet, dans une autre étude, Tom et Denis (2004) ont comparé l'efficacité d'instructions avec des repères seuls («l'hôpital») ou avec des noms de rue comprenant la mention d'un repère («rue de l'hôpital»). Les descriptions contenant uniquement des repères permettent un traitement plus rapide et plus efficace ainsi qu'une meilleure mémorisation, confirmant de nouveau l'importance des repères dans la navigation.

Hölscher, Tenbrink et Wiener (2011) ont demandé à des adultes de décrire des itinéraires dans leur ville de Fribourg. Dans la première expérience, les participants devaient décrire l'itinéraire le plus court pour aller jusqu'à un objectif, puis réaliser l'itinéraire le plus court tout en le décrivant. Aucun des participants n'a réalisé l'itinéraire qu'il avait initialement proposé. Les chemins initialement proposés étaient plus simples (moins de changements de directions) mais moins efficaces (plus longs). Lors de la deuxième expérience, les participants devaient également réaliser un itinéraire et le décrire en même temps ou écrire une description d'itinéraire pour soi ou pour autrui en prévision d'une navigation. Ici encore, les descriptions d'un même objectif (aller de A à B) varient entre les itinéraires planifiés et les itinéraires réalisés. Les itinéraires planifiés pour soi ou pour autrui ne sont pas différents, étant tous deux plus longs que l'itinéraire réellement choisi. Les choix de la route la plus efficace sont donc différents dans une description (au préalable) et en navigation réelle. Les descriptions au préalable sont basées sur des itinéraires simples utilisant le plus possible les grands axes alors qu'en navigation réelle, les participants utilisent plus les directions.

Dans une étude inter-langue, Hund, Schmettow et Noordzij, (2012) ont comparé des descriptions produites par des locuteurs natifs de l'anglais et du néerlandais devant expliquer un itinéraire à partir d'une carte à une personne qui conduit (perspective route) ou qui regarde une carte (perspective survol). Ils observent que les anglophones mentionnent beaucoup de noms de rue ainsi qu'un peu d'informations cardinales et de type «gauche-droite», mais presque pas de repères. En revanche, les néerlandophones mentionnent plus de repères que les anglophones, quelques directions «gauche-droite» et noms de rue, mais pratiquement pas d'informations cardinales. Dans les deux langues, en perspective survol, les locuteurs utilisent plus d'informations cardinales alors qu'avec une perspective route, ils utilisent plus de repères et de directions «gauche-droite»; toutefois, ces différences de perspectives sont moins importantes que celles qui peuvent être attribuées à la langue (et/ou à la culture, cf. le débat évoqué paragraphe 2.2 de ce chapitre, «Différences inter-langues»).

4.4. Exemples d'études chez l'enfant

Quelques études sur les descriptions d'itinéraires chez l'enfant ont également été réalisées. Une étude (Lloyd, 1991) montre que les descriptions d'itinéraires effectuées par téléphone deviennent plus fournies et plus précises entre 7 et 10 ans, mais n'évoluent plus entre 10 ans et l'âge adulte. Dans une autre étude, Robin (2002) a demandé à des enfants de Cours Préparatoire, Cours Elémentaire 1, Cours Elémentaire 2 et Cours Moyen 1 de décrire un plateau composé de six cases sur lesquelles étaient posés des objets familiers. Alors que les enfants de 6 ans énumèrent seulement les différents éléments du damier, les enfants de 7-8 ans utilisent également des termes spatiaux et une stratégie de numérotation précisant la localisation de certains éléments («sur la première ligne...») et ceux de 9 ans utilisent une combinaison de termes spatiaux afin de relier les différents référents entre eux. Selon Weissenborn (1986), les productions verbales d'itinéraires (en allemand) évoluent suivant quatre étapes. Au cours de la première étape, vers 8-9 ans, les descriptions sont basées sur un point de vue local indéterminé. Les enfants fournissent des informations concernant les propriétés des entités, comme leur taille ou leur couleur, mais pas ou peu d'informations sur la position ou la direction entre les éléments. Lors de la deuxième étape, vers 10-11 ans, les descriptions sont basées sur le point de vue du locuteur, fournissant ainsi des informations sur les relations entre les éléments. Au cours de la troisième étape, vers 11-14 ans, le cadre de référence s'élargit. Enfin, les adultes produisent des descriptions tenant compte d'un cadre de référence élargi, mais en y ajoutant des informations d'anticipation (ex. repères ou étapes finales) facilitant une vision globale de l'environnement. On observe donc une évolution progressive des liens entre les éléments, c'est-à-dire des informations concernant la configuration générale de l'environnement.

Dans l'étude d'Allen, Kirasic et Beard (1989), des enfants de 6, 9 et 11 ans devaient décrire un itinéraire dans un labyrinthe préalablement mémorisé. Les résultats montrent une augmentation des mentions correctes d'intersections entre 6 et 11 ans mais pas de différence significative entre les groupes d'enfants concernant la mention de cadres de référence (images du labyrinthe). Dans cette étude, l'information concernant les repères serait donc acquise avant six ans, alors que la capacité à comprendre et/ou à mentionner des liens entre les éléments continuerait à évoluer jusqu'à 11 ans. Ainsi, conceptualiser ou décrire les informations spatio-temporelles et celles concernant la configuration spatiale serait plus difficile pour l'enfant jusqu'à cet âge.

Selon Gallina et Lautrey (2000), la compréhension de descriptions verbales d'itinéraires présentées à l'oral suivrait les étapes du développement des représentations spatiales. Elle

débuterait avec la représentation des repères qui jalonnent l'itinéraire, suivie de l'intégration des informations relatives au parcours entre les repères, et s'achèverait avec la configuration de l'environnement dans son ensemble. Ces auteurs observent une évolution importante du nombre de mentions des repères et des portions de trajet entre 5 et 11 ans au cours du rappel de l'itinéraire. À 5 ans, les enfants mentionnent environ la moitié des six repères, à 8 ans les deux tiers, et à 11 ans presque tous. Les enfants de tous les âges ont plus de difficultés à mentionner les portions du trajet : à 5 ans moins d'une portion du trajet est correctement mentionnée et à 11 ans seulement la moitié (environ trois sur six) d'entre elles est mentionnée correctement. La capacité à se représenter les informations concernant la structure spatio-temporelle de l'itinéraire évolue donc graduellement et continue à se développer tardivement.

En conclusion, les descriptions spatiales d'itinéraires ont une structure linéaire spécifique comprenant des repères, des indications de mouvements et de configuration. Elles mettent en jeu une démarche spécifique nécessitant l'activation de représentations mentales de l'environnement, ainsi que la planification et la formulation d'une procédure. Une sélection des informations est nécessaire afin de permettre une meilleure efficacité (ex. descriptions squelettes); elle comprend généralement les changements de direction et les repères décisionnels. Enfin, l'acquisition de la capacité à mentionner les informations spatio-temporelles reliées est tardive.

Résumé : Le langage dans les représentations spatiales

1) Le discours spatial

- Format linéaire d'une information non-linéaire
- Vocabulaire spécifique/ non-spécifique (en français)
 - Repères (entités à introduire) → noms propres ou communs
 - Expression du mouvement et de situations statiques → groupe verbal (verbes et satellites)
 - Expression des relations spatiales → prépositions et adverbes + échelles conventionnelles
- Systèmes de référence : déictique vs non-déictique

2) Langage et cognition spatiale

- Observations comportementales (ex. réorientation, mémorisation)
- Différences inter-langues
 - différents systèmes de représentation spatiale (ex. relatif versus absolu), des étapes d'acquisitions proches même si le relatif est mature plus tardivement
 - Des performances non-linguistiques souvent similaires

3) Développement → Organisation du discours spatial

- Introductions d'entités nouvelles adaptées → tardivement
- Verbes : trajectoire et/ou manière → précision de l'un puis des deux
- Acquisition (compréhension puis production) des prépositions spatiales
→ graduelle entre 3 et 8 ans (en français)

4) Spécificité des descriptions d'itinéraires

- Discours procédural par succession de segments
- Opérations cognitives : activation, planification, formulation
- Contenu classifié
- Description efficace : exemple de la description squelette
- Description d'enfants : de l'énumération au discours structuré

En conclusion de ce chapitre, le discours spatial est une structure linéaire permettant de représenter une information non-linéaire lors de la construction d'une représentation spatiale d'efficacité comparable à celle d'une carte. Afin d'être produite, une description d'itinéraire nécessite une activation de la représentation mentale de l'environnement, puis une planification du discours, suivie de la formulation de la description. Afin d'être efficace, elle doit comporter certains éléments pouvant être réduits au sein d'une description squelette. Ce discours est constitué d'une structure et de termes spécifiques permettant de fournir des indices de localisation (ex. des repères), de configuration (ex. des prépositions spatiales) et des mouvements (ex. des verbes dynamiques). La capacité à mentionner ces différents éléments semble se développer avec l'âge, comme le montre l'acquisition graduelle de différents moyens langagiers permettant la production d'un discours structuré. Nous prêterons une attention particulière dans cette thèse à l'introduction de repères et à l'expression des relations entre ces entités en fonction de l'âge. Des différences dans le discours spatial selon la langue ou la culture, ont également été mises en évidence par de nombreuses études. Cette diversité du discours spatial a fait émerger de nombreux débats sur les liens entre processus verbaux et non-verbaux dans la cognition humaine. Notre travail a pour ambition d'apporter d'autres éléments pouvant contribuer à ce débat à partir de l'étude de représentations d'itinéraires chez l'enfant français.

Chapitre 3 : Mémoire de travail et représentations spatiales

1. Définition de la mémoire de travail

1.1. La mémoire de travail selon Baddeley

L'intérêt pour le fonctionnement de la mémoire humaine date de l'antiquité (pour revue, Nicolas, 2013). Son étude expérimentale a été abordée par Ebbinghaus (1885) qui en fut un des pionniers et a ainsi mis en évidence de nombreux phénomènes, dont l'oubli pour lequel il est le plus connu. En 1890, William James propose une distinction entre la mémoire « primaire » (conscience d'un présent momentané) et la mémoire « secondaire » (trace d'un passé susceptible d'être rappelé) mais ce concept est pendant longtemps abandonné par les behavioristes. Le courant cognitiviste des années 1950 va voir émerger de nombreux modèles de la mémoire reprenant l'idée de l'existence de deux mémoires distinctes : une à capacité limitée (mémoire primaire ou registre à court terme) et une autre à capacité illimitée (mémoire secondaire ou registre à long terme). Une approche sérielle a d'abord été prônée, qui considère que la mémoire à court terme contrôle le flot d'informations à long terme (ex. Waugh & Norman, 1965 ; Atkinson & Schiffrin, 1968). D'autres modèles ou concepts non sériels vont également être développés parmi lesquels le concept de mémoire de travail va prendre une place particulière.

Le terme de « mémoire de travail » est introduit par Miller, Galanter et Priam (1960) pour définir la mémoire des projets devant être maintenus et accessibles afin de réaliser l'objectif désiré ; cela correspondrait actuellement à notre mémoire « épisodique prospective ». Il a ensuite été développé par Atkinson et Schiffrin (1968) avant d'être adopté comme concept central par Baddeley et Hitch (1974). Il a également été adopté indépendamment en biologie par Olton (1979) dans des études d'apprentissage de labyrinthe chez le rat, et peut être considéré dans ce cas comme l'équivalent de l'étude de la mémoire à long terme chez l'homme. Par analogie avec l'informatique, la mémoire de travail telle que conçue en psychologie humaine peut être assimilée à une mémoire vive.

Bien qu'il y ait eu une multitude de modèles proposés (environ 50 modèles recensés, Baddeley, Eysenck, & Anderson, 2009), celui de Baddeley et Hitch (1974) est le modèle le plus ancien et auquel il est fait le plus classiquement référence en psychologie cognitive. C'est

également celui qui a suscité et continue de susciter le plus de validations empiriques. Son succès tient à sa capacité à rendre compte d'une multitude de faits relatifs au fonctionnement cognitif normal ou pathologique dans des domaines variés (Gyselinck, 2009).

Le modèle de mémoire de travail initialement développé par Baddeley et Hitch (1974) a pour objectif d'expliquer la capacité de maintien temporaire et de manipulation d'informations pendant la réalisation de tâches cognitives complexes telle que raisonner, comprendre ou apprendre (Baddeley, 2000). Un nombre limité d'informations peuvent être maintenues temporairement : sept plus ou moins deux éléments pour un maintien seul (Miller, 1956, 1994), mais seulement quatre éléments (trois pour la composante visuo-spatiale) lorsque ces informations sont mémorisées et manipulées en mémoire de travail par un adulte (Cowan, 2010a). La mémoire de travail est composée de différents sous-systèmes qui permettent à l'homme de comprendre et de se représenter mentalement son environnement immédiat, de maintenir des informations, d'acquérir de nouvelles connaissances et d'agir en fonctions de ses objectifs (Baddeley & Loggie, 1999). Initialement, trois sous-systèmes étaient considérés : « l'administrateur central » ou « centre exécutif », « la boucle phonologique » et « le calepin visuo-spatial » (Figure 6). Un quatrième sous-système a été ajouté ultérieurement : le « buffer épisodique ». Ces systèmes fonctionnent en parallèle c'est-à-dire indépendamment les uns des autres. L'indépendance de ces sous-systèmes est soutenue par des observations cliniques et expérimentales (Gathercole, 1994).

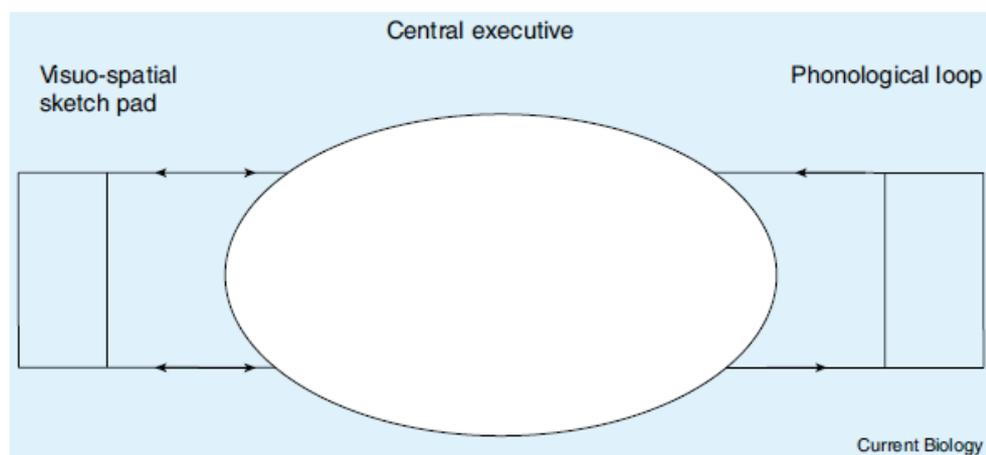


Figure 6 : Modèle de la mémoire de travail proposé par Baddeley et Hitch (1974)

1.1.1. L'administrateur central ou centre exécutif :

L'administrateur central, également appelé centre exécutif est le système de gestion de l'ensemble des systèmes de la mémoire de travail. Il joue le rôle de contrôle attentionnel, c'est-à-dire qu'il est responsable de la répartition des ressources cognitives entre le traitement, la manipulation et le stockage des informations des autres systèmes dit « systèmes esclaves », « auxiliaires » ou « de maintien » (Baddeley, 1986). Il coordonne ces informations mais ne possède pas de capacité de stockage. Il a également un rôle d'inhibition des informations non pertinentes. Il permet la mise en place de stratégies d'encodage et de récupération en mémoire à long terme. Etant un système attentionnel et exécutif, il implique principalement le lobe frontal. Les patients dysexécutifs (présentant une lésion du lobe frontal), ont ainsi des difficultés attentionnelles, d'inhibition et de flexibilité et de planification.

1.1.2. La boucle phonologique

La boucle phonologique permet le maintien passif et la manipulation des informations verbales présentées auditivement ou visuellement (Figure 7). Ce système esclave présente deux composantes principales : « le stock phonologique à court terme » et « la boucle de récapitulation articulatoire ».

Le stock phonologique à court terme permet le maintien passif d'informations verbales pendant une courte durée. Cette capacité de stockage est souvent évaluée à l'aide d'épreuves d'empan numérique ou verbale (répétition de série de nombres, de lettres ou de mots). Ce stock est sensible à l'effet de similarité phonologique. En effet, le rappel de mots ou de lettres qui sont phonologiquement proches (ex. D-P-T) est plus difficile que le rappel de mots ou lettres qui sont phonologiquement plus distincts (ex. A-R-M).

La boucle de récapitulation articulatoire est un processus de répétition de l'information verbale. Par exemple, pour se souvenir d'un numéro de téléphone, nous pouvons le répéter mentalement quelques instants afin de l'écrire. La boucle de récapitulation est sensible à la longueur des mots, c'est-à-dire que plus la durée d'articulation est longue, moins le rappel sériel des mots est important. Ainsi, il est plus facile de mémoriser des mots courts (Main-Bac-Livre) que des mots longs (Montgolfière-Bibliothèque-Aspirateur). Selon ce modèle, lorsqu'une information verbale est entendue par le système auditif, elle fait l'objet d'une analyse phonologique (Figure 7) et est codée sous une forme phonologique. Ce codage est ensuite

maintenu à court terme dans le stock phonologique. L'information peut être réintroduite et maintenue dans le stock phonologique grâce à la boucle de récapitulation. Dans le cas où une information verbale ou verbalisable est présentée sous un format visuel, elle est analysée puis codée sous une première forme visuelle puis sous une forme phonologique grâce au mécanisme de récapitulation articulo-phonologique. La réalisation d'une tâche de suppression articulo-phonologique (reproduction itérative d'une ou de syllabes non-pertinentes) supprime l'effet de similarité phonologique avec du matériel présenté visuellement car l'accès à la boucle phonologique est bloqué, mais pas quand la présentation est auditive.

Afin d'étudier le rôle de ce système esclave dans la réalisation de tâches complexes, de nombreuses études utilisent un paradigme de double tâche qui consiste à réaliser deux tâches de façon concurrente : une tâche principale ou « tâche d'intérêt » (par exemple la mémorisation d'un trajet) et une tâche secondaire dite « compétitive » ou « interférente ». Afin d'évaluer le rôle de la boucle phonologique, la tâche secondaire la plus souvent utilisée est celle de « la suppression articulo-phonologique ». Cette seconde tâche consiste en la répétition de syllabes non-pertinentes (par exemple « Ba/Be/Bi/Bo/Bu »). Cette tâche secondaire affecte la performance de rappel immédiat, c'est-à-dire qu'elle élimine l'effet de longueur des mots en modalité orale, préserve l'effet de similarité phonologique en mode oral et supprime les deux effets en modalité visuelle. Il est également possible de placer l'individu en situation d'écoute inattentive (réaliser la tâche principale dans un environnement rempli de sons langagiers). Certaines utilisations de tâches secondaires sont plus coûteuses sur le plan cognitif, comme des tâches de décision lexicale.

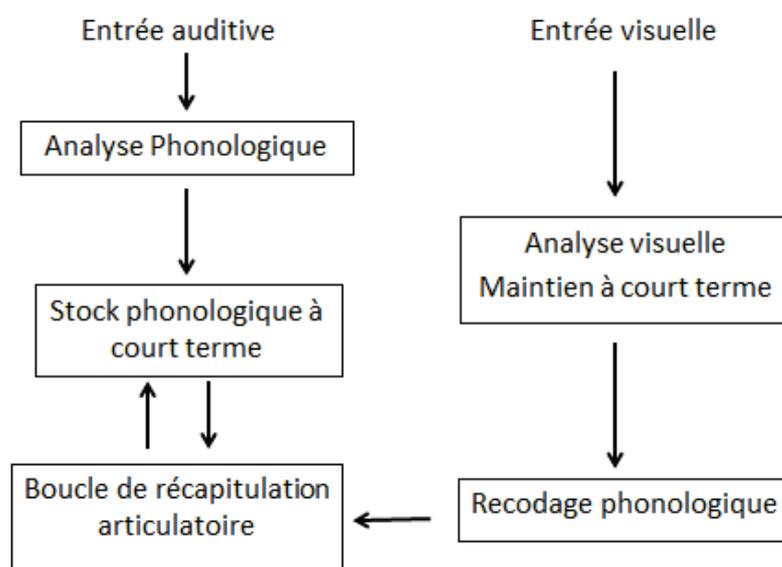


Figure 7 : Schéma du Modèle de la boucle phonologique (inspiré de Baddeley, 1993)

Les aires cérébrales intervenant dans le fonctionnement de la boucle phonologique sont principalement les aires du langage, c'est-à-dire le lobe frontal et temporal de l'hémisphère gauche. Plus précisément, le cache phonologique implique l'aire 40 de Brodmann, c'est à dire le gyrus supramarginal (lobe pariétal inférieur) et la boucle de récapitulation articulaire implique l'aire 44 de Brodmann, c'est à dire une partie de l'aire de Broca (lobe frontal principalement gauche). Ainsi, les patients atteints d'anarthrie (i.e. incapacité de contrôler les muscles articulaires et de pouvoir produire des sons langagiers) sont sensibles à l'effet de longueur des mots alors que les patients atteints d'apraxie ou de dyspraxie articulaire (i.e. trouble de la planification motrice de la parole, sans trouble des systèmes musculaires) ne le sont pas, ce qui peut signer l'absence ou la difficulté d'accès au stock phonologique (Gathercole, 1994). Prenons un exemple de patient présentant une lésion de l'hémisphère gauche, tel que la patiente PV (Vallar & Baddeley, 1984). PV présente une mémoire à court terme déficitaire notamment lorsque le contenu est verbal (empan de 2-3 items) mais elle ne présente pas de déficit de production verbale, écrite ou articulaire. Cette patiente est sensible à un effet de similarité phonologique uniquement lorsque l'information provient d'une source auditive et non visuelle, ce qui soutient l'existence de deux systèmes de traitement distincts ; le stock et la boucle phonologique. L'effet de similarité phonologique spécifique au matériel présenté auditivement implique un déficit du stock phonologique, alors que la non utilisation de la boucle empêche l'information verbale présentée sous un format visuel d'accéder au stock phonologique, et donc d'être touchée par des effets de similarité phonologique. Ces différents cas montrent une double dissociation entre des patients dont le fonctionnement du stock phonologique est affecté (ex. dysarthrie articulaire) et des patients présentant un déficit au niveau de la boucle phonologique (ex. PV).

L'observation de patients porteurs de lésions permet également de montrer l'implication de la mémoire de travail dans des processus cognitifs complexes. Ainsi, la patiente PV dont la boucle phonologique est déficitaire présente des difficultés d'acquisition de vocabulaire nouveau ou de compréhension de phrases complexes. Des observations chez l'enfant relient également de faibles capacités de mémoire phonologique à des productions verbales immatures (phrases courtes, faible vocabulaire, faible complexité syntaxique). Toutefois, ce lien n'est pas présent chez l'adulte (expliqué principalement par l'automatisation de la production verbale impliquant ainsi une faible demande cognitive) et certains patients parviendraient à compenser de tels déficits (Gathercole, 1994).

1.1.3. Le Calepin visuo-spatial

Le calepin visuo-spatial est un système auxiliaire permettant le stock à court terme des informations visuelles et spatiales. Il comporte deux composantes principales : « le cache visuel » et « le scribe interne ». Le cache visuel permet le maintien passif de patterns visuels (forme, couleur, etc.) et détermine ainsi le « quoi » alors que le scribe interne est impliqué dans la récapitulation des informations spatiales, conçu comme l'équivalent de la boucle de récapitulation articulatoire mais pour des informations visuo-spatiales, il détermine l'information sur le « où ». La capacité du calepin est souvent évaluée au travers de mesures d'empan visuo-spatial (notamment les l'épreuve de Corsi), de mémorisation de pattern visuels ou de suivi de sources lumineuses. Cette dissociation entre les informations visuelles et spatiales est soutenue par des données expérimentales (pour une revue, Logie, 1995) mais également par des observations cliniques (Gathercole, 1994, pour une revue). Ainsi, l'expérience de Logie et Marchetti (1991) montre que la mémorisation de patterns spatiaux est altérée par la réalisation de mouvements itératifs de la main pendant l'intervalle de rétention mais pas la mémorisation d'informations visuelles. A l'inverse, la mémorisation des informations visuelles est perturbée par une tâche interférente visuelle (présentation d'images incongrues) mais pas par les mouvements de la main.

Afin d'étudier le rôle de ce système esclave dans la réalisation de tâches complexes, de nombreuses études utilisent également le paradigme de double tâche. La tâche secondaire la plus utilisée est « le tapping ». Cette tâche consiste en la répétition itérative de mouvements de la main ou d'un doigt dans l'espace (par exemple, toucher les touches 1-8-3 du pavé numérique au rythme d'une touche par seconde). Le tapping affecte la performance de rappel immédiat d'informations visuo-spatiales. Certaines tâches ciblent plus spécifiquement le cache visuel, comme la présentation de « bruit » visuel (de type « neige » des anciens téléviseurs, Quinn & McConnell, 1996), une tâche de détection de changements de patterns visuels simultanés (fixes) ou encore une tâche consistant à imaginer sur une montre à aiguille les horaires mentionnées. D'autres tâches ciblent plutôt le « scribe interne », comme une tâche de détection de changements de patterns visuels séquentiels ou consistant à indiquer la direction de sons entendus.

Le calepin visuo-spatial implique des aires cérébrales différentes de celles intervenant dans la boucle phonologique. Il s'agit principalement des aires impliquées dans le traitement d'informations visuelles et spatiales, c'est-à-dire des lobes occipital, frontal et pariétal de l'hémisphère droit, plus précisément les aires 6, 19, 40 et 47. Certains patients (ex L.H.)

présentent un déficit uniquement lors de tâches d'imagerie spatiale et non de mémorisation visuelle ce qui soutient la distinction entre le cache visuel et le scribe interne (Gathercole, 1994).

1.2. Evolution du modèle de Baddeley et quelques autres modèles de MDT

1.2.1. Le buffer épisodique :

En 2000, Baddeley ajoute à son modèle initial un système complémentaire : « le buffer épisodique ». C'est un système de stockage à capacité limitée, contrôlé par l'administrateur central, parfois considéré comme la « mémoire de l'administrateur central ». Ce système est fortement lié au concept de « fonctions exécutives ». Il permet d'intégrer temporairement les informations provenant de différentes sources (boucle phonologique, calepin visuo-spatial et mémoire à long terme) et donc de combiner ces informations (Baddeley, Allan & Hitch, 2011). Ce maintien épisodique multidimensionnel lie tous les types d'informations provenant de nos différents sens (visuelles, auditives, olfactives, gustatives ou kinesthésiques) et permet à ces informations de participer à un codage multidimensionnel. Le buffer épisodique sert de lien entre les différents systèmes de la mémoire de travail et les informations maintenues en mémoire à long terme épisodique. Il permet donc de mettre en place des stratégies de mémorisation d'éléments à court ou long terme en reliant les informations à apprendre avec les connaissances, c'est-à-dire qu'il permet de créer des « chunks » (unité de sens, Miller, 1956). Il est en effet plus facile de mémoriser CNRSINRA (impliquant deux acronymes connus, CNRS et INRA) que CRNASNIR (les mêmes lettres organisées différemment). Il est également possible de créer une phrase pour se souvenir d'éléments, par exemple « Mais Où Est Donc OrNiCar ? » pour se souvenir de toutes les conjonctions de coordination. Le buffer épisodique permet ainsi de consolider des informations (visuelles, auditives et autres) en mémoire à long terme. Ici encore, des protocoles de double tâche ont été proposés pour étudier le rôle de ce système esclave dans la réalisation de tâches complexes. Les tâches secondaires sont principalement des tâches de générations aléatoires de mots ou de chiffres ou de séquences spatiales. Sur le plan des aires cérébrales, le buffer épisodique implique les fonctions exécutives et donc le lobe frontal.

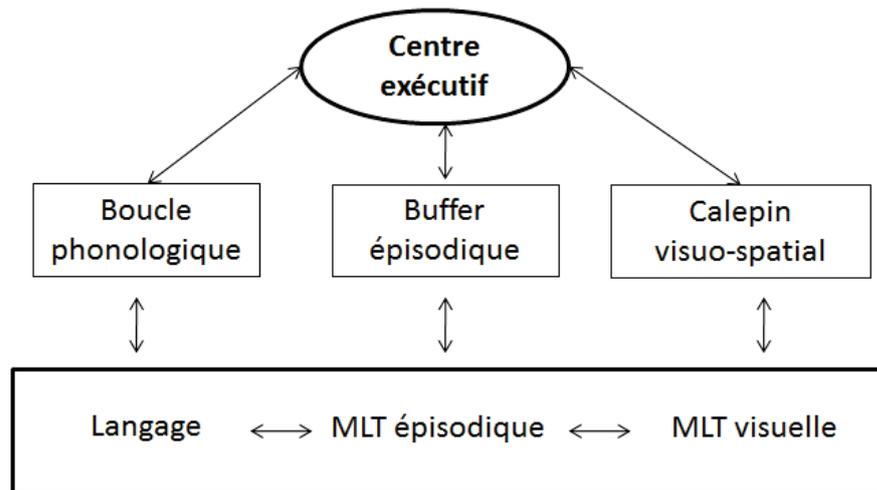


Figure 8 : Schéma du modèle de Baddeley (2000)

Le modèle de la mémoire de travail (voir le schéma du modèle de Baddeley, 2000 dans la Figure 8) comporte donc un système attentionnel (l'administrateur central) et trois systèmes complémentaires (la boucle phonologique pour les informations verbales, le calepin-visuo spatial pour les informations visuo-spatiales et le buffer épisodique pour les informations multiples assemblées entre elles). Chacun de ces systèmes « fluides » est relié au système « cristallisé » de maintien à long terme (mémoire à long terme sémantique, épisodique et visuelle).

En 2011, un modèle révisé a été proposé plaçant le buffer épisodique au centre des interactions (Baddeley, Allen & Hitch, 2011). Le buffer est alors considéré comme un système passif de stockage des informations multidimensionnelles (voir le schéma dans la Figure 9). Ce model prend en compte la variabilité des informations perceptives (visuelle, auditive, gustative, olfactive). Certains chercheurs (ex. Piccardi, Leonzi, D'Amico, Marano & Guariglia, 2014), proposent également de distinguer au sein du calepin visuo-spatial ou plus particulièrement au sein du scribe interne une composante spatial locale (« *reaching working memory* ») et une composante de navigation (« *navigational working memory* »).

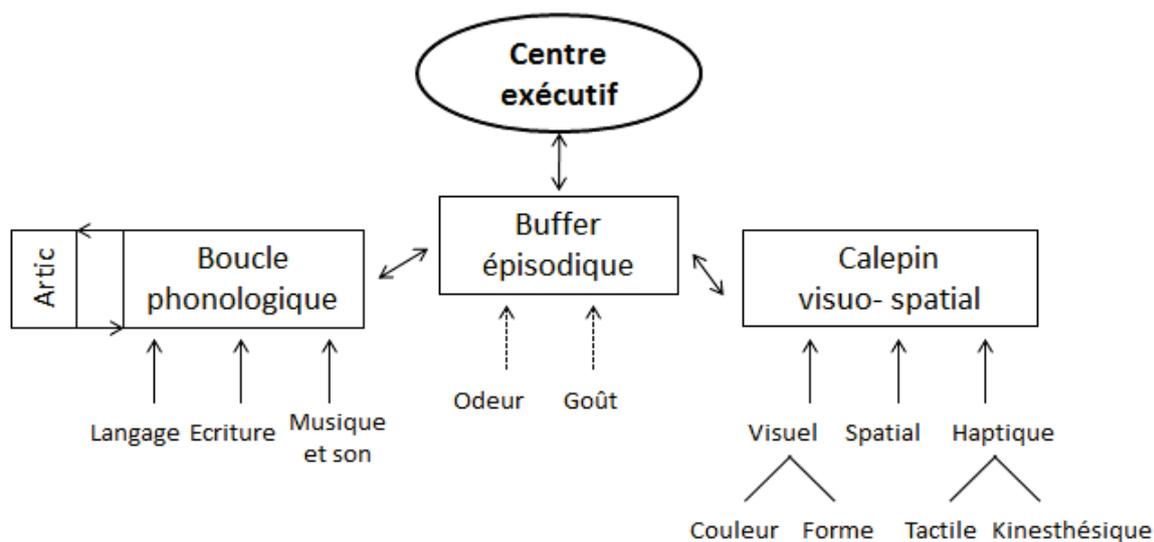


Figure 9 : Schéma du modèle de Baddeley, Allen et Hitch (2011)

Outre le modèle dominant de Baddeley, le concept de mémoire de travail a été repris dans beaucoup de modèles (Baddeley et al., 2009), questionnant notamment le lien entre la mémoire de travail et la mémoire à long terme. L'un des modèles alternatifs le plus connu est le modèle de Cowan (1988, 2005, 2010b, 2012) qui propose une vision différente de la mémoire de travail, notamment une vision unitaire. Selon lui, la mémoire de travail correspond à une activation de la mémoire à long terme. Elle serait constituée d'informations provenant de l'extérieur et de toutes les informations actives en mémoire à long terme, c'est-à-dire d'informations dans le focus attentionnel dont le sujet a conscience et d'informations activées dont le sujet n'a pas conscience. Ce modèle a trois composants principaux : la mémoire à long terme, la mémoire à court terme et le registre sensoriel ainsi qu'un processus central dont le rôle est de diriger l'attention et de contrôler les traitements volontaires, c'est-à-dire de sélectionner les informations du focus attentionnel. Les informations comprises dans ce focus attentionnel sont les informations nouvellement perçues (processus involontaire) ou réactivées du fait de traitements en cours ou de récupération (processus volontaire). L'activation simultanée de plusieurs informations permet de créer des combinaisons d'informations et ainsi générer de nouvelles connaissances à long terme.

D'autres modèles considèrent que la mémoire de travail est une forme d'activation de la mémoire à long terme, comme celui d'Engle (2002). Selon lui la mémoire de travail est composée de représentations en mémoire à long terme activées au-delà d'un certain seuil. Elle est donc constituée de traces actives, de procédures ou d'habiletés nécessaires pour l'activation et le maintien de l'activation et d'attention contrôlée. Cette attention contrôlée aurait une

capacité limitée. Dans le modèle ACT-R d'Anderson (1983, 1993), la mémoire de travail serait une sous partie des connaissances déclaratives stockées dans la mémoire à long terme.

Une littérature importante est produite autour du concept de mémoire de travail et des différents modèles proposés. Cependant, même s'ils diffèrent sur les processus mis en jeu ou leur relation avec la mémoire à long terme, la plupart des modèles s'accordent pour considérer que la mémoire de travail a une capacité limitée, et qu'il est nécessaire de concevoir une distinction entre traitement des informations verbales et visuo-spatiales. Le concept de mémoire de travail a également été depuis longtemps considéré dans le développement, ses capacités limitées pouvant être considérées comme un des facteurs rendant compte de l'immaturation de certaines aptitudes des enfants.

2. Développement de la mémoire de travail chez l'enfant

2.1. Le développement des capacités de mémoire chez l'enfant

La mémoire de travail est sollicitée quotidiennement dès le plus jeune âge. De nombreuses études indiquent que des capacités de mémoire sont présentes très précocement, puis qu'elles augmentent avec l'âge jusqu'à atteindre leur apogée aux environs de 25 ans après lequel les capacités diminuent graduellement. Concernant les capacités de la mémoire de travail, alors que l'empan (simple) de mémoire à court terme d'un enfant de 4 ans est de 3-4 éléments correctement restitués dans l'ordre, celui d'un jeune adulte sera plutôt de 6-7 éléments. Entre 3 et 8 ans, la capacité d'empan sera multipliée par 60%, puis entre l'âge de 8 ans et l'âge adulte elle sera augmentée de 110% (Cowan, 2010b). Ainsi, à la fête d'Halloween alors qu'un enfant de primaire (7-8 ans) peut bien dire « la bourse ou la vie, merci et au revoir », un enfant plus jeune (3-4 ans) pense à dire au mieux l'un des éléments, voire aucun dans certains cas (Cowan, 2012). Pour des empan complexes nécessitant les capacités de mémoire de travail, le développement majeur est plus tardif (vers 6-13 ans selon Gathercole, 1999). Riggs, McTaggart, Simpson et Freedman (2006) ont étudié le développement de la composante visuelle de la mémoire de travail (détecter un changement visuel sur des images contenant de plus en plus d'éléments) entre 5, 7 et 10 ans. Ils observent une évolution progressive avec l'âge, montrant que la capacité de rétention passe de 3 à 4 items (c'est-à-dire à la capacité d'un adulte). Selon Pross, Goanac'h et Gaux (2008), on observe une augmentation des performances de l'ensemble des composantes de

la mémoire de travail (verbale, visuo-spatiale et exécutive) entre 8 et 10 ans, mais les performances verbales sont supérieures aux performances non-verbales et à celles impliquant le centre exécutif. Il semblerait que les systèmes esclaves (boucle phonologique et calepin-visuo-spatial) se spécialiseraient avec l'âge. Par ailleurs, d'après cette étude, les systèmes esclaves seraient de plus en plus liés au centre exécutif dont le fonctionnement dépendrait de la spécialisation de ces systèmes. Les capacités limitées de la mémoire de travail chez l'enfant expliquent également pourquoi les phrases longues sont difficiles à comprendre pour un enfant, car il a souvent oublié le début de la phrase lorsque celle-ci est finie. On observe un effet de récence de l'information mais pas d'effet de primauté chez l'enfant comme chez le patient amnésique (Gathercole, 1994).

Ang et Lee (2010) abordent la question de savoir si les différences de performance observées aux tests évaluant la boucle phonologique et le calepin visuo-spatial sont intrinsèques aux tests (de difficultés différentes) ou aux propriétés des composantes de mémoire de travail. Afin de répondre à cette question, ils demandent à des enfants de 8 et 11 ans de réaliser un test de mémoire visuelle à court terme (mémorisation puis rappel de patterns visuels dont tous les éléments sont présentés en simultané) et de mémoire de travail (mémorisation de patterns visuels dont les éléments sont présentés de façon séquentielle) dans une condition contrôle (test seul) ou de suppression exécutive (test avec génération aléatoire de chiffres). Les performances des enfants de 11 ans sont meilleures que celles des enfants de 8 ans mais l'effet de double tâche est plus important chez les enfants de 11 ans, c'est à dire qu'ils sont plus affectés par la tâche de suppression des ressources exécutives, leurs scores se rapprochant alors de ceux des plus jeunes. Les enfants de 11 ans utiliseraient donc leurs ressources exécutives pour réaliser une tâche visuelle de mémoire à court terme ou de mémoire de travail de façon plus efficace que les enfants plus jeunes.

2.2. Des hypothèses explicatives

Plusieurs explications de ce développement ont été proposées, que nous illustrerons ci-dessous et qui sont principalement centrées sur l'augmentation des capacités globales de la mémoire de travail et de l'efficacité des opérations. Il est en effet souvent supposé qu'il y existe une compétition pour l'affectation et la mobilisation des ressources pour le maintien et la manipulation des informations (qui partageraient les mêmes ressources); c'est-à-dire qu'il y aurait un conflit entre la durée du traitement et celle du rafraîchissement : plus le traitement est rapide, plus il laisse de temps pour le rafraîchissement (Camos & Barouillet, 2014). Ci-dessous

sont résumées certaines hypothèses sur le développement centrées sur : la capacité à sélectionner des informations, les capacités de stockage, le délai de rétention, le délai de traitement, les stratégies et le lien avec le développement cérébral.

L'une des hypothèses proposée concerne l'augmentation de la **capacité à sélectionner** les informations. Ainsi, Cowan, Morey, AuBuchon, Zwilling et Gilchrist (2010) ont présenté sur un écran des cercles et des triangles, demandant à leurs participants (7-8 ans, 11-12 ans et adultes) de prêter attention à la couleur des cercles mais pas des triangles. Chez l'ensemble des participants, enfants comme adultes, ils observent une meilleure rétention des informations de couleurs à mémoriser (les cercles) que des informations à ignorer (les triangles) mais cet avantage est présent de la même manière dans tous les groupes. La différence d'empan mnésique ne peut donc pas expliquer la différence d'attention entre les groupes (observation avec 4 items comme avec 6 items et les plus jeunes n'arrivent pas à réaliser l'exercice).

Une autre hypothèse concerne l'augmentation des **capacités de stockage**. Ici encore il est bien difficile de déterminer si une augmentation dans la capacité de rétention est due à une augmentation de la capacité de stockage basique ou à une augmentation de l'efficacité du stockage. En effet, il est possible d'augmenter le nombre d'éléments retenu à court terme en augmentant la taille des chunks. Un exemple très connu chez l'adulte est l'expérience d'Ericsson, Chase et Falloon (1980) dans laquelle ils ont entraîné un homme pendant 20 mois à réaliser des chunks de plus en plus grands jusqu'à obtenir des super-chunks (à partir de records d'athlétisme présentés sous la forme de chiffres). Ainsi, l'empan de ce participant passa de 7 à 80 chiffres. Dans leur étude, Gilchrist, Cowan et Naveh (2009) ont demandé à des enfants de 7 et 12 ans et à des adultes de mémoriser des suites de mots ou des phrases (ayant le même nombre de mots). Ils ont ainsi observé une augmentation du nombre de phrases mémorisées avec l'âge. Cependant, lorsqu'une phrase était mémorisée, autant d'éléments étaient restitués dans tous les groupes.

Une troisième hypothèse expliquant le développement des empan est l'augmentation du délai de rétention, c'est-à-dire de la **capacité de maintien** de l'information. Notons tout d'abord qu'il est difficile d'étudier ce délai de rétention car les enfants les plus âgés et les adultes mettent en place des stratégies de rafraîchissement. Cowan, Nugent, Elliott et Sauls (2000) ont étudié la mémorisation d'items visuels à restituer à des intervalles de 1, 5 ou 10 secondes après la fin de la liste (le nombre d'items de la liste correspondant à l'empan de l'individu), chez des enfants de 8 et 11 ans et des adultes. Ils observent une augmentation de l'oubli avec le temps dans tous les groupes d'âge mais le nombre d'éléments retenus augmente avec l'âge. Le pattern d'oubli étant

identique entre les trois groupes, le délai ne peut expliquer le développement avec l'âge du nombre d'items mémorisés.

L'une des hypothèses la plus soutenue est l'augmentation de la **vitesse de traitement** des informations. En particulier, Baddeley, Thomson et Buchanan (1975) trouvent que des adultes peuvent mémoriser autant d'items qu'ils peuvent en citer en 2 secondes, montrant ainsi une relation linéaire entre les nombres d'items cités et rappelés. Ce résultat fut également observé chez les enfants (Case, Kurland & Borlberg, 1982). Towse, Hitch et Hutton (1998) évaluent les vitesses de traitement lors de tâches de comptage (« *counting span* »), de calcul (« *operation span* ») et de lecture (« *reading span* ») chez des enfants de 6 à 11 ans, en fonction de la complexité de la tâche et des items (en début ou en fin d'empan). Ils observent une augmentation avec l'âge de la vitesse de traitement ainsi qu'un effet de difficulté identique pour l'ensemble de ces épreuves. Towse et Hitch (1995) ont mesuré la vitesse et l'empan de comptage en demandant à des enfants de 6, 7, 8 et 11 ans de compter pour chaque item présenté le nombre de carrés bleus parmi des triangles. Une fois la série d'items finie, ils doivent rappeler de mémoire le nombre de carrés de chaque item. Le test d'empan était de difficulté variable selon le nombre de triangles et selon que leur couleur était congruente ou non avec celle des cibles. L'ensemble des performances diminue en fonction de la difficulté croissante des items (notamment lorsque la couleur des cibles et des distracteurs était congruente). De plus, la vitesse de traitement et l'empan augmentent avec l'âge, c'est-à-dire que les enfants les plus âgés sont plus rapides et récitent des séries de nombres plus longues que les plus jeunes. Enfin, plus l'enfant compte rapidement, plus son empan est élevé, ce qui étaye l'observation de Case et al. (1982). Notons toutefois, que ce résultat n'est plus significatif lorsque l'on contrôle l'effet de l'âge.

Selon Gaillard, Barrouillet, Jarrold et Camos (2011), le développement des performances d'empan des enfants est lié à la vitesse de traitement et de rafraîchissement des informations. Ils ont présenté des empans complexes à des enfants de 8½ ans et de 11½ans. Les empans complexes étaient composés de lettres à mémoriser qui étaient intercalées entre des chiffres auxquels il fallait ajouter 1. A la fin de la série, les enfants devaient restituer l'ensemble des lettres dans leur ordre de présentation. Le rythme de présentation des items était variable. L'empan des enfants de 11½ ans est supérieur à celui des enfants de 8½ ans et une présentation rapide diminue les performances notamment chez les enfants plus âgés. Les auteurs ont alors aligné les valeurs de différentes variables, à l'aide de méthode statistiques, selon les âges des enfants, tels les temps de traitement des items (les enfants de 8½ ans devaient ajouter 1 alors que ceux de 11½ ans ajoutent 2 ce qui leur prend autant de temps) et la durée de rafraîchissement des enfants (par modification de l'intervalle inter-stimuli). Une fois les temps de traitement devenus

similaires, les profils précédents étaient maintenus, mais la différence d'empan entre les groupes d'âges avait diminué. De même, une fois la durée de rafraîchissement alignée, les performances ne variaient plus en fonction de l'âge. Les chercheurs en concluent donc que le développement des performances des enfants est lié à la vitesse de traitement et de rafraîchissement.

Une hypothèse également très largement soutenue, compatible avec la précédente est le développement de **stratégies de rafraîchissement** et donc de maintien de l'information. L'une des premières stratégies utilisées est la répétition verbale de l'information, ce qui permet le rafraîchissement de l'information. Au fur et à mesure des répétitions, cette récitation s'automatise et donc mobilise de moins en moins d'attention. La répétition verbale est sensible à l'interférence. En effet, si l'on interrompt quelqu'un au cours d'une répétition ou si l'on empêche cette répétition, les performances baissent très fortement. Les études utilisant la suppression articulaire en sont un bon exemple. D'autres stratégies, comme le regroupement d'items en chunks (ensemble qui a un sens), favorisent également la mémorisation, comme l'a démontré l'étude d'Ericsson et al. (1980) mentionnée ci-dessus, dans laquelle la valeur d'empan d'un homme a ainsi été augmentée. Tam, Jarrold, Baddeley et Sabatos-DeVitos (2010) évaluent chez des enfants de 6 et 8 ans la capacité de maintien attentionnel et de rafraîchissement par répétition verbale au moyen ; d'un test d'empan verbal simple (mémoriser des mots concrets d'une syllabe présentés à l'oral et par une image), d'empan avec différents délais (délais entre l'empan et la restitution), le test de Brown-Peterson, c'est-à-dire un test d'empan avec délai occupé par un test de catégorisation (indiquer si une pièce est en or ou argent) et empan complexe (les éléments de l'empan sont intercalés avec la tâche de catégorisation). Les enfants de 8 ans ont des meilleures performances que ceux de 6 ans, le délai simple montrant un impact plus important chez les enfants de 6 ans. Dans une seconde expérience, d'autres enfants de 6 et 8 ans ont réalisé soit un test d'empan simple (images de mots concrets) soit différents empans avec délais. Cela pouvait être la version verbale du test Brown-Peterson (items à mémoriser présentés en alternance avec la dénomination de la couleur de cercles verts ou rouges) ou sa version visuelle (items intercalés avec l'indication du côté d'apparition de cercles). L'ensemble des tests comprenait des items qui étaient phonétiquement similaires ou dissimilaires. Les enfants de 8 ans ont de meilleures performances que ceux de 6 ans, mais sont plus impactés par le test Brown-Peterson verbal que visuel. De plus, les items dissimilaires sont mieux retenus (surtout chez les 8 ans). Ces expériences permettent d'observer une évolution des performances et des stratégies. En effet, elles suggèrent qu'alors que les enfants de 6 ans réalisent une mémorisation passive, les enfants de 8 ans mettraient en place une stratégie de répétition verbale, ce qui permet le rafraîchissement

des informations mais augmente la sensibilité à l'effet de similarité phonologique et aux interférences verbales.

Par ailleurs, ce développement de la mémoire de travail est étroitement lié à la maturation des lobes frontaux et pariétaux et à la myélinisation des neurones (de leurs axones), c'est-à-dire à une amélioration de la vitesse de connexion entre les neurones. Ces observations biologiques soutiennent donc les hypothèses attentionnelles (l'attention étant principalement située dans l'aire pariétale), de stratégies (le fonctionnement exécutif étant principalement situé dans les lobes frontaux) et de vitesse de traitement (lié aux connections inter-neuronale).

3. Mémoire de travail et navigation

3.1. Etudes chez l'enfant

Quelques études ont mis en évidence un lien entre les capacités de mémoire de travail et les capacités de navigation chez l'enfant, mais les résultats sont contradictoires. Reprenons deux études précédemment évoquées. L'étude de Fenner et al. (2000) propose à des enfants de 5-6 ans et de 9-10 ans une épreuve de navigation en environnement réel ainsi que l'évaluation d'habiletés visuo-spatiales (rotation mentale, empan spatial et raisonnement) et verbale (connaissance des voyelles, complétion de mots, compréhension et empan de chiffres). Sur la base de ces évaluations, les auteurs ont distingué les personnes à habileté visuo-spatiale élevée ou faible et ces mêmes personnes selon leurs compétences verbales fortes vs faibles. Ils observent alors que les personnes ayant de fortes habiletés visuo-spatiales ont de meilleures performances de navigation que les personnes ayant de faibles capacités visuo-spatiales ; les compétences verbales n'étant pas associées aux performances de navigation. Les auteurs considèrent donc que les capacités de mémoire de travail visuo-spatiale mais pas celles de mémoire de travail verbale seraient liées aux capacités de navigation.

Purser et al. (2012) ont proposé une navigation et mémorisation d'un labyrinthe virtuel à des enfants de 5 à 12 ans ainsi qu'une évaluation de leurs capacités cognitives incluant la connaissance de vocabulaire, le raisonnement non-verbal, les capacités de flexibilité-inhibition, d'empan verbal, visuel et spatial ainsi que de mémoire épisodique verbale et visuo-spatiale. Ils ont observé que les compétences de navigation (c'est-à-dire le nombre d'essais nécessaires pour une navigation sans erreur et le nombre d'erreurs par essai) étaient liées aux capacités cognitives, incluant les capacités de mémoire à court terme verbale et visuo-spatiale. Ces deux études

suggèrent donc un rôle de la mémoire de travail dans la navigation impliquant soit uniquement la mémoire de travail visuo-spatiale ou soit les composantes verbale et visuo-spatiale. Le rôle de ces deux composantes pourrait être précisé à l'aide du paradigme de double tâche et un certain nombre d'études ont exploré leur rôle dans les représentations spatiales d'itinéraires chez l'adulte. Cependant, à notre connaissance, aucune recherche à ce jour n'a été menée chez l'enfant.

3.2. Rôle des différentes composantes de la mémoire de travail au cours de l'encodage et/ou de la restitution d'itinéraires

De nombreuses études ont étudié le rôle de la mémoire de travail dans le fonctionnement cognitif chez l'adulte dans différentes situations expérimentales en s'appuyant sur le paradigme de double tâche (tâches concurrentes verbales, visuelles, ou spatiales). En ce qui concerne les représentations spatiales, ces travaux ont étudié le rôle de la mémoire de travail lors de l'encodage et/ou de la restitution de représentations d'itinéraires présentés sous différents formats, par exemple au cours de navigations réelles ou virtuelles, de descriptions verbales (voir Gyselinck & Meneghetti, 2011 pour une revue) ou de restitution sur cartes.

Ainsi, l'étude de Garden, Cornoldi et Logie (2002) testait l'effet d'interférence du « tapping » (répétition de pression de touches suivant une configuration spatiale spécifique) et de la suppression articulatoire (répétition verbale des syllabes Ba /Be /Bi /Bo /Bu /Ca /Ce /Ci /Co /Cu) sur la mémorisation et la reconnaissance d'une liste de non-mots ou de deux itinéraires, dans un milieu non familier (la ville de Padova en Italie). Ces itinéraires étaient présentés sous forme d'une suite de segments de carte dans la première expérience ou au cours d'une navigation réelle dans la deuxième expérience. Les auteurs ont mis en évidence un effet d'interférence des deux doubles tâches sur la reconnaissance de non-mots et de segments d'itinéraires, ainsi que sur la capacité de navigation réelle (plus d'erreurs, d'imprécisions et de courtes pauses). Cependant, dans l'expérience 1 (présentation de segments d'itinéraires), la tâche de répétition articulatoire interfère plus avec la mémorisation de non-mots et la tâche de tapping interfère plus avec la mémorisation des segments des itinéraires. En revanche, dans l'expérience 2, les deux doubles tâches interfèrent autant avec les performances en navigation réelle. De plus, les participants ayant de fortes capacités visuo-spatiales sont plus affectés par le tapping que par la répétition verbale et inversement pour les participants à faibles capacités visuo-spatiales. Les résultats suggèrent donc que 1) **les composantes verbales et spatiales de la mémoire de travail sont impliquées dans l'apprentissage d'itinéraires** (provenant de séquences d'images ou d'une

navigation réelle) ; et 2) des **différences interindividuelles** influencent les ressources impliquées dans la représentation spatiale.

Comme dans l'étude en navigation réelle (Garden et al., 2002), l'étude de Meilinger, Knauff et Burthoff (2008) montre des résultats similaires dans une situation de navigation virtuelle. Dans cette expérience sur la mémorisation de la ville de Tübingen, virtuelle, sont proposées des conditions contrôle, de double tâche visuelle (imaginer sur une montre à aiguilles les horaires dictées), spatiale (indiquer la provenance des sons entendus) ou verbale (tâche de décision lexicale). Les résultats montrent un **effet d'interférence des conditions de double tâche verbale et spatiale sur les performances de navigation, mais pas de la tâche secondaire visuelle**. La composante visuelle ne jouerait donc pas de rôle majeur dans la navigation. Dans l'étude de Gras, Gyselinck, Pérussel, Orriols et Piolino (2013), après avoir mémorisé des itinéraires virtuels dans une condition contrôle (sans tâche interférente), et de double tâche verbale de suppression articulatoire (répéter Ba/Be/Bi/Bo/Bu) et spatiale impliquant le tapping (taper un pattern spatial), les participants devaient dessiner une carte de l'itinéraire, reconnaître des images de repères et positionner les repères sur une carte. Un effet d'interférence du tapping, mais pas de la suppression articulatoire, est observé dans le tracé de l'itinéraire (vision survol). Par ailleurs, un effet d'interférence des deux doubles tâches a été observé pour la localisation de ces repères sur une carte mais pas pour la reconnaissance des repères (vision route). De plus, des différences individuelles émergent dans les résultats. Les personnes ayant un score élevé d'empan spatial subissent une interférence du tapping dans la localisation des repères contrairement aux personnes à faible score d'empan spatial, et les personnes utilisant préférentiellement une stratégie de type route (attesté par un questionnaire) subissent une interférence de la suppression articulatoire, contrairement aux personnes utilisant peu cette stratégie. Les **effets d'interférence seraient donc différents selon les tâches de restitution** (impliquant des connaissances en survol comme avec la carte ou lors de la localisation des repères ou de type route comme lors de la reconnaissance des repères) et selon **les capacités** (ici d'empan spatial) ou **les stratégies** (route ou survol) des individus. Les connaissances et stratégies de survol semblent être plus sensibles aux interférences notamment spatiales.

Picucci, Gyselinck, Piolino, Nicolas et Bosco (2013) ont présenté un même itinéraire, soit en réalité virtuelle, soit sous la forme d'une description verbale, dans une condition contrôle (expériences 1 et 2) ou de double tâche de tapping ou de suppression articulatoire (expérience 2). Les participant(e)s devaient ensuite vérifier des phrases (implicites ou explicites) et dessiner une carte de l'environnement. Le nombre de repères et de routes correctement indiquées sur la carte ainsi que le taux de vérifications correctes de phrases (uniquement pour les phrases explicites

dans l'expérience 1) sont plus importants lors d'une présentation virtuelle qu'après une description verbale, mais le nombre de repères mentionnés est plus faible et le temps de réponses aux vérifications est plus long. L'avantage produit par la présentation virtuelle sur la vérification de phrases disparaît lorsque les participants devaient concurremment réaliser du tapping, qui interfère avec l'ensemble des performances. Quant à elle, la suppression articulatoire interfère avec l'ensemble des performances des deux types d'encodage, mais dans une moindre mesure. La différence entre l'encodage en environnement virtuel et sous forme de description verbale augmente lorsque la restitution est essentiellement visuelle (localisation et tracé), c'est-à-dire lorsque l'encodage et la restitution sont visuels. **La congruence ou l'incongruence entre le type d'encodage et le type de restitution influence donc le poids relatif des différentes composantes** (la composante spatiale étant plus impliquée lors d'un encodage et une restitution visuels).

De même, Pazzaglia, De Beni et Meneghetti (2006) ont mis en évidence le rôle de la mémoire de travail dans différentes tâches : rôle de la composante verbale (effet de suppression articulatoire) et visuo-spatiale (effet du tapping) de la mémoire de travail au cours de l'encodage de descriptions verbales d'environnement spatial (vision route) et de procédures non-spatiales (par exemple, produire du vin). Elles ont également montré un rôle de la composante visuo-spatiale de la mémoire de travail au cours de la restitution du texte spatial uniquement (rappel et vérification de phrases). Brunyé et Taylor (2008) évaluent le rôle de la composante verbale et visuo-spatiale ainsi que celui du buffer épisodique lors de l'encodage et la restitution de descriptions d'itinéraires en visions route et survol. Lors de l'encodage, ils observent plusieurs effets : un effet d'interférence de la double tâche du buffer épisodique (tâche de génération de séquences spatiales et de perception auditive-spatiale) sur l'ensemble des performances, un effet du tapping (composante spatiale) sur la représentation graphique (surtout en vision route) et un effet de la suppression articulatoire sur la vérification de phrases. Lorsque les doubles tâches sont réalisées au moment de la restitution, le tapping interfère avec la vérification d'affirmations nécessitant de réaliser une inférence afin d'y répondre, alors que la suppression articulatoire interfère plutôt avec la vérification d'affirmations présentées dans la description (affirmations verbatim). Ainsi, les auteurs confirment que **l'encodage et la restitution de représentations spatiales impliquent des composantes multiples de la mémoire de travail, qui diffèrent selon le point de vue** (route versus survol). La restitution en vision survol (carte et inférences) impliquerait la composante spatiale, notamment lors d'une présentation initiale d'une description route, alors que la vision route (affirmations verbatim) impliquerait plutôt la

composante verbale. Les deux types de représentations d'itinéraires semblent également impliquer le buffer épisodique.

Dans une autre étude, Pazzaglia, Meneghetti, De Beni et Gyselinck (2010) examinent la mémorisation de descriptions verbales d'environnements d'un point de vue route ou survol, et constatent que les rappels libres de l'environnement (description verbale et tracé sur carte) et les vérifications de phrases sont affectées par les doubles tâches de suppression articulatoire (répéter Ba/Be/Bi/Bo/Bu) et de tapping (répéter une séquence spatiale). Ils notent également que les performances impliquant des environnements présentés avec une perspective route diminuent avec les deux tâches interférentes, mais que celles impliquant des environnements présentés avec une perspective de survol diminuent uniquement lors d'interférence verbale. Ces auteurs ont proposé cette même expérience en ajoutant des descriptions de procédures non-spatiales (fabrication de vin, d'huile et de charbon) et en remplaçant les conditions de double tâche par des interférences visuelles-simultanées (détecter la présence de changement entre un pattern visuo-spatial et le précédent) ou spatiales-séquentielles (présentation séquentielle des éléments constituant des patterns visuo-spatiaux). Les performances de rappel libre (description et carte) et de vérification de phrases de l'ensemble des descriptions diminuent avec les deux types de double tâche (simultanée ou séquentielle), les descriptions en vision route étant plus affectées en rappel libre par la double tâche séquentielle que par la double tâche simultanée (performances contrôles > simultanées > séquentielles). Selon ces résultats, **la représentation mentale de descriptions implique des formats verbaux et visuo-spatiaux mais le type de description influence les formats utilisés** ; des descriptions d'environnement en vision route impliquent aussi bien des représentations verbales (réactivées par la boucle phonologique) que des représentations visuo-spatiales simultanées et séquentielles, alors que la représentation en survol impliquerait principalement une représentation sous forme verbale et visuelle (simultanée).

Deyzac, Logie et Denis (2006) montrent des résultats qui complètent ces différentes observations. Dans leur étude, de jeunes adultes devaient construire une représentation mentale de descriptions d'itinéraires présentées selon une vision route ou survol, soit en condition contrôle, soit avec des tâches interférentes spatiales (tapping), visuelles-passives (jugement de clarté), visuelles-dynamiques (fixer un « bruit visuel » en mouvement) ou de suppression articulatoire (répéter « B »). A partir de la représentation construite, ils devaient ensuite dessiner une carte de l'itinéraire. Les résultats montrent que la tâche de tapping provoque une interférence sur l'ensemble des performances, c'est-à-dire sur le nombre de repères et de directions indiqués sur la carte, principalement en perspective route (une interférence est observée uniquement pour les directions en perspective survol). La tâche de jugement de clarté (visuelle passive) interfère

autant avec l'ensemble des performances. En revanche, la tâche visuelle dynamique interfère avec l'indication de repères en perspective route, mais facilite légèrement les performances (repères et directions) en perspective survol. Enfin, la tâche de suppression articulatoire interfère avec la mémorisation des descriptions route et survol, mais principalement avec l'indication de repères lors de la mémorisation de descriptions en survol. La mémorisation des repères est donc sensible aux interférences visuelles et spatiales (mémorisation passive et dynamique) avec une description en vision route et aux interférences verbales avec une description en survol, alors que la mémorisation des directions est sensible aux interférences de la composante spatiale des deux types de description. Ces résultats renforcent donc les **implications différentes de la mémoire de travail dans la représentation route ou survol d'itinéraire**. Toutefois, alors que dans l'étude précédente, la vision route semblait être principalement sensible à la composante verbale et la vision survol à la composante spatiale, ici, **la vision route semble principalement être affectée par les composantes visuelles et spatiales, et la vision survol par les composantes spatiales et verbales**.

3.3. Différences inter-individuelles : Influence de la stratégie, des capacités de rotation mentale et du sens de l'orientation

Dans deux études de Gyselinck et al. (2007, 2009), des jeunes adultes ont mémorisé des descriptions verbales d'environnements en suivant soit une consigne d'imagerie mentale (s'imaginer l'environnement) soit une consigne de répétition mentale verbale (se répéter le texte décrivant l'environnement), dans chacune des trois conditions de double tâche (contrôle, suppression articulatoire et tapping). Les résultats montrent que les performances des participants ayant utilisé une **stratégie d'imagerie** sont meilleures que celles des personnes ayant utilisé une **stratégie de répétition**. Cependant, les performances diffèrent aussi selon la nature de la double tâche : dans la condition imagerie, elles sont notamment sensibles aux effets d'interférence spatiale, alors que dans la condition de répétition verbale elles sont notamment sensibles à la suppression articulatoire. Par ailleurs, dans les deux études, les participants ayant de bonnes **capacités visuo-spatiales** réalisent de meilleures performances lorsqu'ils utilisent une stratégie d'imagerie mentale mais ils sont sensibles au tapping dans la condition imagerie (dans l'étude de 2007 mais pas dans celle de 2009) et à la suppression articulatoire lors de répétition verbale (dans les deux études). En revanche, les personnes ayant de faibles capacités visuo-spatiales sont peu influencées par le type de stratégie utilisée, mais subissent des effets d'interférences différents selon la stratégie : une interférence de la suppression articulatoire lors

de l'utilisation de la stratégie de répétition verbale et une interférence de la suppression articulatoire et du tapping lors de la stratégie d'imagerie. **Les formats de représentations mentales semblent donc différer selon la stratégie utilisée (la stratégie d'imagerie étant la moins sensible) et les capacités de l'individu (les personnes à faible capacités visuo-spatiale étant les plus sensibles,** voir pour une revue sur les différences individuelles, Pazzaglia, Gyselinck, Cornoldi & De Beni, 2012).

Dans deux autres études, Meneghetti et collaborateurs. (Meneghetti, Gyselinck, Pazzaglia & De Beni, 2009 ; Meneghetti, De Beni, Gyselinck & Pazzaglia, 2013) observent aussi l'influence des **capacités de rotation mentale** sur l'apprentissage d'un itinéraire présenté sous la forme d'un texte. Elles montrent que les personnes ayant de faibles capacités de rotation mentale bénéficient d'un entraînement à l'utilisation de la stratégie d'imagerie mentale lors de la mémorisation d'itinéraires. Cependant, elles sont sensibles à l'interférence de la double tâche spatiale, même si la stratégie d'imagerie diminue cet effet d'interférence. Les personnes possédant de bonnes capacités spatiales ont plus de ressources visuo-spatiales, leur permettant de compenser plus facilement les interférences en mémoire de travail. L'étude de Meneghetti, De Beni, Gyselinck et Pazzaglia (2011a) permet de préciser que **les capacités de rotation mentale sont un prédicteur des capacités de représentation mentale d'itinéraires** présentés à l'écrit et **que les capacités de mémoire de travail visuo-spatiale sont un médiateur de ces capacités.**

Baldwin et Reagan (2009) ont, quant à eux, testé l'effet du **sens de l'orientation** sur le rôle de la mémoire de travail dans l'apprentissage de routes virtuelles à l'aide du paradigme de double tâche au cours de l'encodage (tapping et suppression articulatoire). Ils observent que les personnes possédant un faible sens de l'orientation s'appuient principalement sur la composante verbale (et sont donc plus sensibles à l'interférence de la suppression articulatoire qu'à celle du tapping), alors que les personnes possédant un bon sens de l'orientation sont plus sensibles à l'interférence du tapping (c'est-à-dire qu'elles utiliseraient plus la composante spatiale). Wen, Ishikawa et Sato (2011) ont également testé le rôle du sens de l'orientation sur l'utilisation des composantes verbales, visuelles et spatiales de la mémoire de travail dans l'apprentissage d'itinéraires vidéos mémorisés avec ou sans double tâche (décision lexicale, imaginer l'heure indiquée sur une montre à aiguille ou indiquer la direction de sons). Ils observent que les personnes possédant un bon sens de l'orientation encodent les repères et les routes verbalement et spatialement, et qu'ils construisent une représentation en survol grâce à l'utilisation des trois composantes de la mémoire de travail. En revanche, les personnes possédant un faible sens de l'orientation encodent les repères verbalement et s'appuient sur la composante visuelle pour leurs connaissances des routes. Ces études confirment l'**influence des habiletés visuo-spatiales**

sur l'utilisation de stratégies de mémorisation d'itinéraires par répétition verbale ou par imagerie mentale, l'imagerie mentale permettant une meilleure représentation de l'espace.

D'autres études montrent que ces stratégies d'apprentissage sont modifiées suivant le nombre d'encodages réalisés. Meneghetti, De Beni, Pazzaglia et Gyselinck (2011b), ont fait écouter (une ou trois fois) une description d'un itinéraire en perspective route soit en condition contrôle, soit avec une tâche interférente de tapping ou de répétition verbale. Les participants devaient ensuite réaliser une épreuve de vérification de phrases et de représentation graphique de la description. Alors que les performances de vérifications de phrases diminuent avec la suppression articulatoire (indépendamment du nombre d'écoutes), la représentation graphique subit l'interférence des deux doubles tâches uniquement dans le cas de trois écoutes. Ce résultat montre donc une **modification de l'effet d'interférence et donc de l'implication de la mémoire de travail au cours de l'apprentissage** d'un itinéraire.

Des chercheurs se sont également intéressés au rôle de la mémoire de travail dans l'apprentissage de cartes. Par exemple, dans l'étude de Coluccia, Bosco et Brandimonte (2007), des participants ont mémorisé un itinéraire soit uniquement sur une carte (groupe contrôle), soit avec une tâche de tapping ou de suppression articulatoire (Ba/Be/Bi/Bo/Bu /Da/De/Di/Do/Du). Les participants devaient ensuite reproduire l'itinéraire sur une carte. Les chercheurs observent une interférence du tapping sur la mémorisation de la route et de l'emplacement des repères mais pas d'influence de la suppression articulatoire. Ils proposent alors à des participants de mémoriser l'itinéraire sur la carte puis de la dessiner, et mesurent leurs habiletés de navigation et de mémoire de travail visuo-spatiale (séquentielle/simultanée, active/passive). Ils mettent en évidence un lien entre la localisation des repères et le tracé de l'itinéraire avec la capacité de mémoire de travail visuo-spatiale simultanée-passive et active.

Résumé : Mémoire de travail et représentation spatiale

1) La mémoire de travail

- Concept de Baddeley : rôle de stockage et de manipulation à court terme

4 composantes :

- Centre exécutif : le coordinateur
- Boucle phonologique (stock phonologique+ boucle de récapitulation articulatoire)
→ stockage et manipulation des informations verbales
- Calepin visuo-spatial (cache visuel + scribe interne)
→ stockage et manipulation des informations visuo-spatiales
- Buffer → stockage des informations multidimensionnelles
 - Critiques et autres modèles (ex. Cowan)

2) Développement

- Augmentation de la capacité mnésique, jusqu'à 25 ans
- Hypothèses explicatives :
 - Capacité de sélection/d'attention
 - Capacité de stockage
 - Délais de rétention
 - Vitesse de traitement
 - Stratégie de rafraîchissement

3) Mémoire de travail et navigation

- Peu d'études chez l'enfant

Chez l'adulte

- Utilisation du paradigme de double tâche
- Rôle des composantes de la mémoire de travail variable (Figure 10)
- Multiples influences :
 - Point de vue : route vs survol

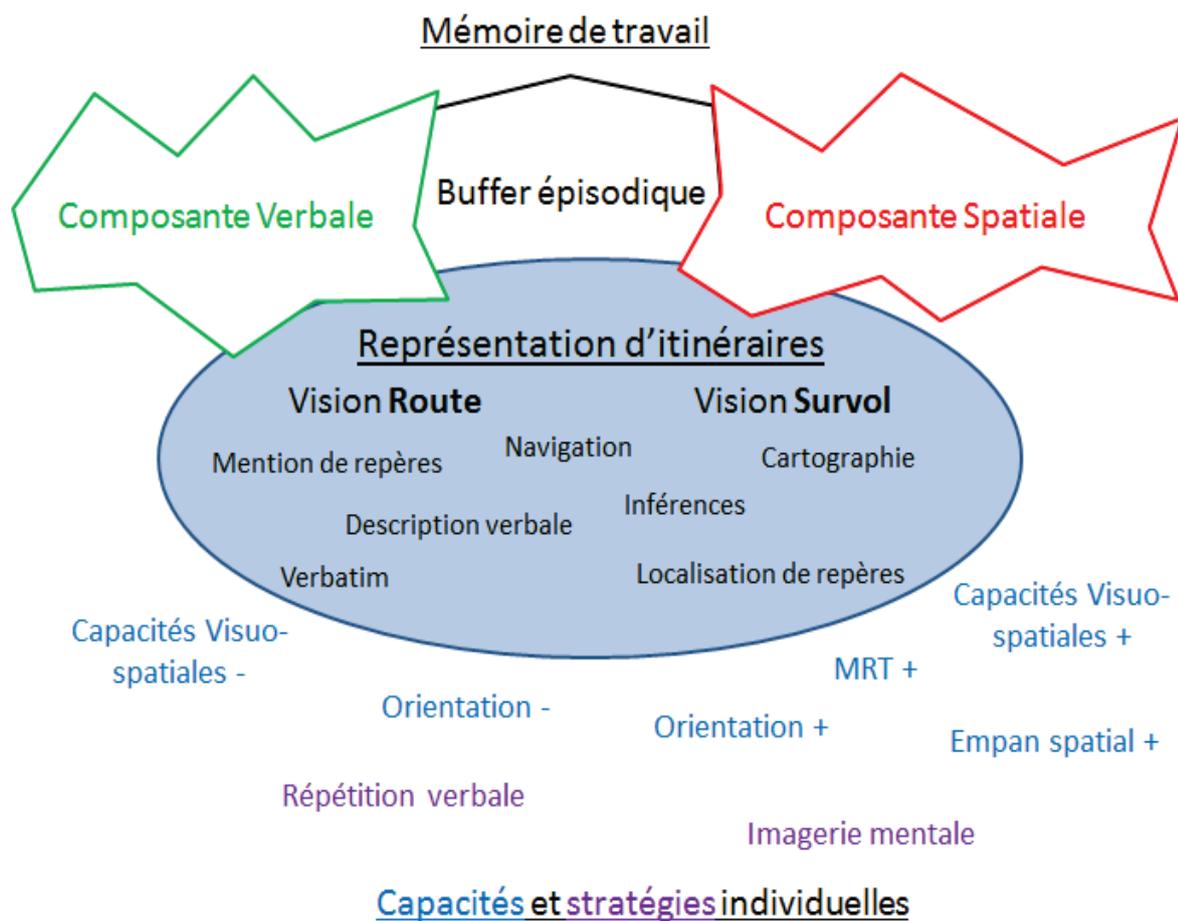


Figure 10 : Résumé schématisé des liens entre la représentation d'itinéraires, les composants de la mémoire de travail et les facteurs individuels (capacité et stratégie)

En conclusion, les études disponibles consacrées au rôle de la mémoire de travail dans l'élaboration de représentations spatiales d'itinéraires concernent principalement des populations d'adultes. Les résultats mènent aux conclusions principales suivantes. Tout d'abord, au cours de l'encodage de représentations spatiales (ainsi qu'au cours de leur restitution, mais dans une moindre mesure), différentes composantes de la mémoire de travail semblent être impliquées (verbale, spatiale, visuelle, buffer). L'implication de la boucle phonologique et du calepin visuo-spatial a été observée aussi bien lors d'études en navigation (réelle ou virtuelle) que lors de l'utilisation de supports symboliques, comme les descriptions ou les cartes. Ces résultats concordent avec l'hypothèse de double codage des représentations spatiales complexes. Toutefois, les interférences spatiales sont souvent plus importantes que les interférences verbales. Ce résultat pourrait montrer un plus grand rôle de la composante spatiale et/ou des

différences de difficulté entre les tests. En effet une grande variabilité de tâches est utilisée pour rendre compte des représentations spatiales construites dans les études réalisées chez l'adulte. Elles peuvent être de nature verbale ou visuo-spatiale et impliquer des connaissances spatiales variées, ce qui peut rendre compte des différences d'implication des composantes de la mémoire de travail.

Les conclusions montrent également différents degrés ou types d'interférences – et donc d'implication des différentes composantes de la mémoire de travail –selon le point de vue de l'encodage ou de la restitution (route ou survol). Même si l'ensemble des composantes est mobilisé, la vision survol est plus sensible à la composante spatiale alors que la vision route est plus sensible à la composante verbale. Certaines études ont également trouvé des résultats inverses. Ces résultats apparemment contradictoires peuvent être expliqués par des différences interindividuelles dans les capacités ou stratégies, ces facteurs pouvant modifier l'implication des différentes composantes. L'utilisation de l'imagerie mentale implique principalement la composante visuo-spatiale de la mémoire de travail, alors que la répétition verbale implique plutôt la composante verbale. Les personnes possédant de bonnes capacités visuo-spatiales utilisent plus facilement une stratégie de survol et d'imagerie mentale, qui impliquent plutôt la composante visuo-spatiale, alors que les personnes possédant de faibles capacités visuo-spatiales utilisent plutôt une stratégie de répétition verbale sensible à la suppression articulatoire. D'autres facteurs comme le nombre de fois où l'environnement a été encodé (c'est-à-dire l'« ancrage » de la représentation) influencent le poids relatif de différentes composantes intervenant dans les performances des sujets.

Contrairement à ces études effectuées auprès d'adultes, très peu de travaux sont disponibles en ce qui concerne l'enfant et aucun n'utilise le paradigme de double tâche. Quelques études ont mis en évidence des liens entre les habiletés cognitives, parmi lesquelles la capacité de la mémoire de travail (empan verbal et visuo-spatial) et les capacités de représentation spatiale d'itinéraires. Par ailleurs, le développement de la mémoire de travail semble être lié à l'utilisation de stratégies impliquant soit une vision de type route, soit une vision de type survol d'un environnement, qui (en tout cas chez l'adulte) modulent l'importance des différentes composantes impliquées dans la création des représentations.

Au cours de cette thèse, nous étudierons le rôle des composantes verbales et spatiales de la mémoire de travail dans le développement de représentations d'itinéraires chez les enfants et les adultes. Pour atteindre cet objectif, nous utiliserons un paradigme de double tâche au cours de l'encodage d'itinéraires virtuels ainsi que des études des liens entre les capacités d'empan et les capacités de représentations spatiales. Nous pourrions ainsi observer le rôle des composantes verbale et spatiale de la mémoire de travail à différents âges (du jeune enfant au jeune adulte), pour en préciser le développement. Cela nous permettra d'étudier précisément le format verbal et/ou visuel des représentations d'itinéraires au cours du développement et ainsi observer si ce sont les mêmes composantes et donc les mêmes formats de mémorisation qui sont utilisés chez des enfants de 7 et 10 ans que chez des adultes.

PARTIE II : Etudes expérimentales

La cognition spatiale est un vaste domaine de recherche. Au cours de cette thèse et des expériences qui la composent, nous nous intéressons au développement des capacités de représentation d'itinéraires. L'une des questions abordées concerne le format (verbal et/ou non-verbal) de cette représentation. Dans cette partie, trois études expérimentales sont présentées dans trois chapitres successifs. La première étude (Chapitre 4) s'intéresse à la formation d'une représentation d'un itinéraire virtuel par des enfants de 5 à 10 ans et par des adultes. La qualité de cette représentation est évaluée à l'aide de différentes mesures de production et de reconnaissance verbale et visuo-spatiale. Les performances de représentation de l'itinéraire sont ensuite mises en relation avec les compétences d'attention, de mémoire de travail, de perception des directions, ainsi que de production et de compréhension du langage.

La deuxième étude (Chapitre 5) précise le rôle de la position des repères (décisionnel versus confirmatoire) sur leur mémorisation évaluée sous un format verbal et visuel, ainsi que sur la capacité de reconnaissance des directions. L'influence de la dénomination sur la reconnaissance visuelle des repères est également étudiée. Cette deuxième expérience a également pour objectif de vérifier l'équivalence de différents itinéraires virtuels ainsi que des épreuves de restitutions verbales et non-verbales qui seront utilisés dans la troisième étude.

La dernière étude (Chapitre 6) s'intéresse au rôle des composantes verbales et visuo-spatiales de la mémoire de travail lors de la mémorisation d'itinéraires virtuels, à l'aide de doubles tâches verbale et visuo-spatiale. Le rôle de ces composantes dans l'acquisition de représentations au cours du développement de l'enfant est évalué lors de restitutions verbales et non-verbales. Enfin, les capacités de représentation d'itinéraires sont mises en relation avec les compétences cognitives et langagières des participants.

Chapitre 4 :

Expérience 1 _ Evaluer le développement de la représentation spatiale : variabilité des tâches verbales et visuo-spatiales

1. Introduction

Des capacités de cognition spatiale sont observées dès les premières mois de vie dans des tâches d'habituation (ex. Oakes, Hurley, Ross-Sheehy & Luck, 2011; Richmond, Zhao & Burns, 2015), puis à partir de 2 ans dans des tâches de recherche d'objets (ex. Ribordy, Jabès, Banta Lavenex & Lavenex, 2013; Nardini et al., 2006 ; Lehnung et al, 1998 ; Bullens et al., 2010) et enfin, dans des tâches plus complexes telles que la navigation. Nous centrerons cette étude sur le développement des compétences complexes de représentation d'itinéraires au cours des périodes relativement tardives du développement (entre 5 et 11 ans) à l'aide de tâches variées de restitution de connaissances sur les itinéraires appris.

Rappelons que selon Piaget et Inhelder (1948) puis Siegel et White (1975), les représentations d'itinéraires se développent par étapes successives. La première étape serait l'acquisition de la connaissance des repères. Cette connaissance est centrée sur le point de vue de l'individu, c'est-à-dire qu'elle est égocentrée. Une seconde étape permettrait l'acquisition des connaissances de type route, c'est-à-dire de la succession de mouvements associés aux repères ; celle-ci étant principalement constituée d'une suite de points de vue égocentrés. Enfin, la dernière étape serait l'acquisition de la connaissance générale de l'environnement, de sa configuration, appelée « connaissance de type survol », pour lequel un point de vue allocentrique est adopté. Ce développement par étapes a été partiellement étayé par l'étude de Cousin et al. (1983), qui a évalué les connaissances spatiales que possèdent les enfants de 7, 10 et 13 ans de leur école. L'ensemble des enfants arrive jusqu'à la destination demandée, la majorité d'entre eux reconnaît également bien les repères, un peu moins arrivent à ordonner des séquences de l'itinéraire, encore moins à indiquer les distances et très peu arrivent à estimer la position des repères. Toutefois, certains enfants parviennent à réaliser des tâches complexes alors qu'ils échouent à des tâches plus simples. Cette étude confirme partiellement l'acquisition par étapes des connaissances spatiales : la connaissance des repères puis de la route et enfin de la

configuration. D'autres études vont à l'encontre de cette hypothèse. En effet, la présence de connaissances de type route ou de type survol est mise en évidence dès 4 ans (Huttenlocher, Vasilyeva, Newcombe & Duffi, 2008). Ces premières connaissances seraient donc acquises en même temps que l'acquisition d'informations de type repère ou de type route, ce qui contredit l'hypothèse d'étapes successives dans l'acquisition des représentations (des connaissances de type route aux connaissances de type survol). Cependant, la distinction entre ces trois types de connaissances continue à éclairer certains résultats.

La connaissance des repères

La présence de repères améliore la mémoire spatiale (Presson, 1987) et ainsi la capacité à trouver son chemin chez les enfants et les adultes. Elle n'influence toutefois ni les comportements d'orientation, tels que le nombre de demi-tours, ni les connaissances de la configuration spatiale, telles que l'estimation des directions ou du chemin le plus court (Jansen-Osmann & Fuch, 2006). Les enfants sont capables d'utiliser les repères d'un itinéraire (Fenner et al., 2000 ; Jansen-Osmann et al., 2007) dès 5 ans. Pour que les repères les aident dans les performances de navigation, ils doivent tout d'abord apprendre à y prêter attention. En effet, conseiller à des enfants de 6 et 12 ans de faire attention à des repères proximaux (i.e. repère proche de la route) les aide à reproduire l'itinéraire (Cornell et al., 1989). Toutefois, faire attention aux repères distants (i.e. repère vus de loin) n'aide que les enfants de 12 ans à maintenir leur orientation sur la bonne route. Cette étude suggère donc une connaissance des repères d'un point de vue égocentré chez les plus jeunes mais une connaissance plus générale des repères pouvant utiliser des informations allocentriques par les enfants de 12 ans. Une seconde étude (Cornell et al., 1992) montre que les enfants de 8 et de 12 ans sont capables de mentionner des repères temporaires ayant été désignés mais que les enfants les plus âgés en mentionnent davantage, dont notamment des repères stables et distants.

Parmi les repères, certains d'entre eux jouent un rôle stratégique, notamment les repères situés à un changement de direction (i.e. repères décisionnels). Cohen et Schuepfer (1980) ont demandé à des enfants de 7-8 et 11-12 ans et à des adultes de mémoriser un itinéraire dans un labyrinthe présenté à l'aide de diapositives, comprenant des repères de différents types (décisionnels, incorrects ou sans changement de direction). Les repères décisionnels étaient mieux mémorisés que les autres. Par ailleurs, les enfants les plus jeunes rappellent moins de repères que les enfants plus âgés qui en rappellent moins que les adultes. Cette étude a été répliquée par Jansen-Osmann et Wiedenbauer (2004) à l'aide d'une navigation en réalité

virtuelle. Les résultats confirment la meilleure mémorisation des repères décisionnels. Toutefois, aucune différence significative n'est observée entre les performances des enfants de 11-12 ans et les adultes. Une interprétation possible est que la présentation en réalité virtuelle, plus proche d'une navigation réelle, favoriserait l'intégration de l'itinéraire par les participants. Ces différentes études confirment le rôle de la position des repères au cours d'un itinéraire et ce dès 7 ans ; les repères situés à un point de réorientation étant les plus importants pour reproduire un itinéraire (Michon & Denis, 2014).

Lien entre la connaissance des repères et celle de type route

La connaissance des repères est liée à la connaissance de la route elle-même. En effet, la connaissance de type route est souvent considérée comme comprenant la séquence des décisions prises et des repères rencontrés au cours de l'itinéraire (ex. Farran et al., 2012). Buchner et Jansen-Osmann (2008) précisent que ce n'est pas l'équivalent d'une suite de repères mais bien une connaissance dynamique contenant des informations sur les distances. La connaissance de la route comprend donc des informations sur les actions, les emplacements, les directions, les distances et les relations entre les éléments.

Comme cela a été vu plus haut (Chapitre 2, section 1), l'expression verbale des actions de type déplacements dans l'espace nécessite l'utilisation de verbes de mouvement et/ou de marqueurs de relations spatio-temporelles qui évoluent avec l'âge. En français, notamment, on observe une augmentation de la richesse sémantique des énoncés jusqu'à un âge tardif, permettant aux enfants (à partir de 7 ans) d'exprimer des informations multiples concernant ces mouvements (Hickmann, 2003; Hickmann et al., 1998). Selon Lloyd (1991), les descriptions d'itinéraires d'enfants, deviennent plus riches et plus précises entre 7 et 10 ans mais évoluent peu entre 10 ans et l'âge adulte. Dans l'étude de Waller (1986), des enfants de 5-6 ou 8-9 ans devaient expliquer des emplacements d'éléments à leur camarade. Les analyses de ces descriptions verbales montrent que les enfants de 5 ans précisent principalement les directions et l'emplacement final de l'élément à trouver, alors que les enfants de 8 ans précisent plutôt les repères et l'emplacement final.

Le nombre de mentions correctes d'intersections augmenterait également entre 6 et 11 ans mais pas celle des cadres de référence (Allen et al., 1989). Au contraire, selon Gallina et Lautrey (2000), il y aurait une évolution importante du nombre de mentions des repères et des séquences de l'itinéraire entre 5 et 11 ans. Or, l'efficacité d'une description d'itinéraire dépend

de l'habileté à connecter les actions aux repères (Daniel et al., 2003). De plus, l'apprentissage des actions qui sont liées à une position évolue tardivement. Bauer, Doydum, Pathman, Larkina, Güler et Burch (2012) ont observé la mémorisation d'évènements (ex. : l'expérimentateur raconte une histoire drôle), d'emplacements (ex. à une petite table) et d'évènements liés à un emplacement, chez des enfants de 4 à 8 ans. Ils ont observé un effet de l'âge sur l'ensemble de ces mesures. De plus, seuls les enfants de 8 ans ont réussi à situer correctement les évènements. Cette étude indique que la mémorisation à long terme des événements et de leur localisation se développe tardivement.

L'expression des actions spatiales est souvent située en fonction de distances, de repères, ou de relations spatiales. Les difficultés de compréhension des relations spatiales chez les plus jeunes induiraient des difficultés dans la connaissance de la route des enfants (Waller, 1986). En français, les prépositions spatiales sont principalement acquises (comprises puis produites) entre 3 et 6 ans mais certaines sont acquises plus tardivement, comme par exemple la préposition « devant » qui n'est acquise que vers 8 ans (Piérart, 1977). À partir de descriptions d'un damier sur lequel étaient posés des objets familiers, Robin (2002) observe l'évolution suivante avec l'âge : les enfants de 6 ans énumèrent les éléments du damier ; par comparaison, ceux de 7-8 ans utilisent des termes spatiaux ou une stratégie de numérotation ; et ceux de 9 ans combinent des termes spatiaux ensemble, permettant ainsi de vraiment relier les différents éléments entre eux et ainsi de construire une représentation globale du damier.

La production verbale de descriptions d'itinéraires semble donc s'améliorer tout au long de l'enfance, tout comme les capacités de navigation. Comme le rappelait Waller (1986), les enfants réussissent mieux à naviguer qu'à réaliser les tâches de connaissances spatiales unidimensionnelles, comme par exemple reconnaître des repères.

Connaissance de la configuration

La connaissance de la configuration générale de l'environnement permet à un individu de situer des éléments dans l'environnement en partant de tout point, d'évaluer des distances, de dessiner un plan de l'environnement, et de trouver le chemin le plus court pour atteindre une destination. Etant basée sur un point de vue allocentrique ou Euclidien, cette connaissance serait acquise tardivement (théorie piagetienne). Toutefois, des connaissances de survol sont observées très précocement. Par exemple, Huttenlocher et al. (2008) ont observé des capacités chez des enfants de 4 ans à placer et à retrouver des objets à partir d'une maquette simple. L'utilisation

d'une carte simple dès cet âge est possible chez les enfants voyants mais également chez les non-voyants (Landau, 1986). Et elle est possible même lorsque la carte n'est pas orientée dans la même direction que l'environnement en présence de repères (Blades & Spencer, 1990). Selon Peter et al. (2010), la moitié des enfants de 4 ans comprennent les représentations symboliques comme une maquette simple (dont chaque bâtiment est représenté dans une couleur spécifique), et la majorité des enfants de 5-6 ans peuvent utiliser une carte complexe (maquette unicolore). Toutefois, dans cette étude, l'utilisation de la carte selon un point de vue différent – nécessitant donc une rotation mentale – est difficile pour ces enfants même s'ils parviennent indépendamment à réaliser des rotations mentales. Herman (1980) a montré que des enfants de 6 ans arrivent à replacer des éléments de mémoire sur une maquette. La précision des placements et l'ordre de placement des éléments progressent entre 6 et 9 ans. Ces observations ont été confirmées dans une réplique de cette étude à l'aide d'une présentation de la représentation de la maquette en réalité virtuelle (Sandamas & Foreman, 2007).

Toutefois, Hund et Plumert (2003) montrent l'impact de facteurs sémantiques sur ces placements. Dans leur étude, des enfants de 7, 9 et 11 ans et des adultes devaient mémoriser la configuration d'éléments appartenant à quatre catégories, placés présentés soit de façon aléatoire, soit par catégorie dans un même quadrant d'une boîte carrée (ex. tous les animaux dans le premier quartier). A tous les âges, lorsque les éléments d'une même catégorie étaient rassemblés par quadrant, les repères étaient placés trop près les uns des autres. Les adultes arrivent à mieux distinguer les emplacements de repères d'une même catégorie que les enfants. Cette étude suggère que le caractère sémantique des éléments influence leur positionnement et que ce biais diminue avec l'âge.

Différences inter-individuelles

Enfin, des différences interindividuelles de représentation spatiale ont été observées chez l'enfant et l'adulte. Ces différences sont principalement expliquées par certaines habiletés cognitives comme l'attention, la mémoire, les fonctions exécutives chez l'adulte (ex. Fields & Shelton, 2006) ou chez l'enfant (ex. Hemmer et al., 2013 ; Purser et al., 2012 ; Neidhart & Poll, 2010). Toutefois, selon Quaiser-Phol, Lehmann et Eid (2004) les habiletés spatiales de petite échelle (vue en une seule fois) seraient bien distinctes des capacités de grande échelle (ne pouvant être vue en une seule fois) comme la navigation dans un grand espace. Par ailleurs, le rôle des capacités verbales a été peu étudié et peu d'études ont examiné conjointement ces deux types d'habiletés cognitives. Dans leur étude, Fenner et al. (2000) ont marché avec des enfants

de 5-6 et 9-10 ans dans un campus puis ont mesuré les capacités de navigation ainsi que certaines capacités visuo-spatiales (rotation mentale, empan spatial, raisonnement) et langagières (connaissance des voyelles, tâche de complétion de mots, compréhension, empan de chiffres). Ils ont observé un effet asymétrique des habiletés verbales et visuo-spatiales sur les capacités de navigation. Les enfants possédant de fortes compétences visuo-spatiales avaient de meilleures capacités de navigation que ceux qui possèdent de faibles capacités visuo-spatiales, mais les capacités verbales n'étaient pas significativement liées aux performances de navigation. Ce résultat semblerait indiquer l'absence d'influence du langage sur la cognition spatiale.

En conclusion, on observe une augmentation des capacités de navigation et de transmission d'informations concernant un itinéraire, qui sont le reflet d'une représentation mentale de l'environnement. Cette augmentation qualitative et quantitative est attestée indépendamment dans des épreuves variées de production et de reconnaissances verbales ou visuo-spatiales. Des débats existent encore sur cette évolution, par exemple autour de deux questions : les capacités sous-jacentes sont-elles précoces ou se développent-elles graduellement par étapes successives (connaissances des repères puis de type route, puis de type survol) ? Quel est le rôle du langage dans cette évolution ? Par ailleurs, à tout âge, des différences inter-individuelles sont constatées, et une question est de déterminer à quelles capacités cognitives, notamment visuo-spatiales ou langagières, elles sont liées.

2. Problématique

Au cours de la navigation spatiale, nous percevons de multiples informations que nous devons traiter, mémoriser et manipuler, afin de construire une représentation de l'environnement. Cette représentation nous permet de retrouver notre chemin et de l'indiquer à autrui. Chaque individu construit une représentation qui lui est propre. Comme indiqué précédemment, cette représentation dépend entre autres de ses connaissances générales et de ses capacités qui peuvent évoluer. Par exemple, on observe des différences entre les enfants et les adultes, montrant une augmentation de la précision des descriptions d'itinéraires, de la capacité de reconnaissance des repères ou encore de la capacité de navigation.

L'évolution des capacités est observée à l'aide de nombreuses tâches et elle semble concerner aussi bien des connaissances verbales que visuelles ou visuo-spatiales. Toutefois, peu

d'études ont évalué et comparé ces deux formats ou types de représentations. Le développement des différentes capacités de représentation se fait-il en parallèle, impliquant alors une représentation unique comprenant des informations visuelles et spatiales ou impliquant différentes représentations dépendantes les unes aux autres ? Ou se fait-il en « décalé », impliquant alors plutôt un format particulier de la représentation, ou du moins une indépendance du format de représentation ? Si la représentation s'appuie sur un format spécifique, nécessite-t-elle un développement d'habiletés verbales ou visuo-spatiales spécifiques ? Les différences inter-individuelles observées sont-elles expliquées par des différences de compétences verbales ou plutôt visuo-spatiales ?

Afin d'aborder ces questions, une première étude expérimentale a été réalisée auprès d'enfants entre 5 et 11 ans et de jeunes adultes. Son objectif principal est d'évaluer la représentation d'un itinéraire virtuel et les habiletés visuo-spatiales et langagières sous-jacentes.

3. Méthode

3.1. Participants

Un total de 96 sujets ont participé à l'expérience : des enfants de 5 à 11 ans (N=61) et des jeunes adultes de 18 à 30 ans (N=35), tous de langue maternelle française. Les enfants étaient tous scolarisés dans les classes de **grande section de maternelle** (GSM), **cours élémentaire** (CE) ou **cours moyen** (CM) de deux écoles primaires de milieu rural. Ils ont été recrutés au sein de leur école, par des courriers adressés à leurs parents, avec l'accord des directeurs, des enseignants et du comité de parents d'élèves. Les **adultes** sont principalement des étudiants de psychologie de l'université Paris Descartes et de l'école des psychologues praticiens de l'institut catholique de Paris. Ils pouvaient être rétribués sous la forme de validation de points pour un enseignement. Les participants inclus dans l'étude ne devaient pas être bilingues, ni avoir séjourné plus de six mois dans un pays non francophone, ni présenter de troubles d'acquisition, de troubles moteurs ou de troubles visuels. De plus, les enfants ne devaient pas présenter plus d'un an de retard ou d'avance scolaire. Trois enfants et quinze adultes ont été exclus des analyses du fait d'un problème technique (trois adultes), de leur connaissance préalable de tests complémentaires (deux adultes), de bilinguisme (un enfant et trois adultes), de daltonisme (deux adultes), de dyslexie (un adulte) ou de faibles performances à l'épreuve

d'attention (deux enfants et un adulte). Une performance est considérée comme faible ou forte lorsque le score est éloigné de plus de trois écarts types par rapport à la moyenne du groupe de l'individu.

Au final, 79 participants ont donc été inclus dans les analyses : des enfants de GSM (N=22, 6,0 ans \pm 4 mois ; 13 filles et 9 garçons ; 17 droitiers), des enfants de CE (N=18, 8,1 ans \pm 5 ; 9 filles et 9 garçons ; 15 droitiers), des enfants de CM (N=19, 10,2 ans \pm 5 mois ; 9 filles et 10 garçons ; 19 droitiers) et des adultes (N=20, 20,8 ans \pm 15 mois ; 11 femmes et 9 hommes ; 16 droitiers). Dans la population étudiée, le ratio de participants de sexe masculin et féminin ainsi que la latéralité manuelle ont été contrôlés dans chaque groupe d'âge (moitié filles/garçons et dominance du nombre de droitiers).

3.2. Matériel

Le matériel se compose d'un questionnaire préalable, d'itinéraires virtuels, de six épreuves de restitution et de tests complémentaires.

3.2.1. Questionnaire préalable

Le questionnaire initial reprend les **caractéristiques démographiques** (âge, genre, niveau scolaire) et évalue la **latéralisation manuelle**, l'**habitude à se promener** seul (jamais, une/deux fois par an, une/deux fois par semaine, plus de trois fois par semaine ; type de trajet), la fréquence d'**utilisation de nouvelles technologies** (i.e. ordinateur ou jeux vidéo, jamais, une/deux fois par an, une/deux fois par semaine, plus de trois fois par semaine) ainsi que l'**histoire linguistique** du/de la participant(e) (langue des parents et séjours dans des pays non francophones). La présence/connaissance d'un trouble de type dyslexie, trouble locomoteur ou trouble visuel (lunette, lentille, daltonisme) était demandé.

3.2.2. Itinéraires virtuels

Une petite histoire a été créée pour introduire l'expérience et mettre les enfants en situation d'étudier les itinéraires et de réaliser les différentes tâches (voir Annexe 1).

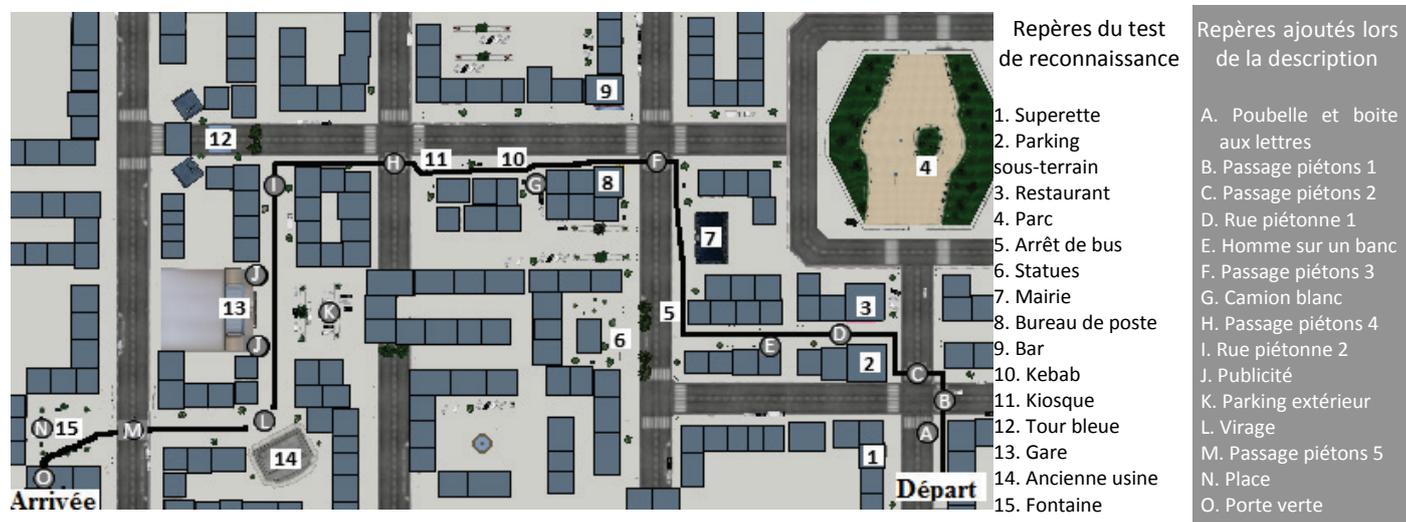


Figure 11 : Carte de l'environnement (test) avec l'itinéraire en noir, les repères utilisés lors de la reconnaissance visuelle (nombres en blanc) et les repères ajoutés lors de la description verbale (lettres en gris)

Deux itinéraires ont été créés dans des **villes virtuelles** : un itinéraire court et assez pauvre, servant à l'entraînement, et un itinéraire test plus long et plus riche. Ces itinéraires ont été créés avec le logiciel « Virtools 5.0, Dassault system ». Ils sont issus de deux environnements urbains distincts, comportant des routes et des rues piétonnes, ainsi qu'un ensemble d'immeubles d'habitations « neutres », de bâtiments spécifiques différents (magasins, gare, mairie, bâtiments d'usine ou de bureau, etc.), d'éléments urbains (boîtes aux lettres, bancs, lampadaires, feux, publicités, poubelle), de personnages, de véhicules (exemples en Annexe 2). Les itinéraires sont présentés sur un écran d'ordinateur (Fujitsu Celsius H270; 15.4 pouces) du point de vue d'un piéton qui se déplace. L'itinéraire d'entraînement dure 40 secondes. Il comporte deux croisements correspondant également à des changements de direction dans le parcours (tourner à droite puis à gauche) et cinq éléments spécifiques servant de repères (un feu tricolore, un passage piéton, une boîte aux lettres, une rue piétonne et une porte de garage). L'itinéraire test (Figure 11) dure trois minutes trente. Il comporte quatorze **croisements** dont sept avec quatre directions possibles (« en croix ») et sept avec trois directions possibles (« en T »). Trente repères proximaux (i.e. proche de l'itinéraire) sont utilisés mais quatre d'eux sont initialement distaux (i.e. visibles de loin ; exemple : une tour bleue). La moitié des repères est *décisionnel* (i.e. : situé

à un changement de direction avéré), l'autre moitié est *confirmatoire* (i.e. : situé à un endroit non lié à un changement de direction). Par exemple, « monsieur X tourne à gauche d'un parking sous-terrain » (repère décisionnel) mais « passe devant la mairie » (repère confirmatoire).

- **Epreuves de restitution**

- Description verbale de l'itinéraire

La description du trajet est enregistrée à l'aide d'un dictaphone puis transcrite et codée avec le programme CLAN du système informatique CHILDES (MacWhinney, 2000).



Figure 12 : Carte utilisée pour tracer l'itinéraire test

- Tracé de l'itinéraire (Figure 12)

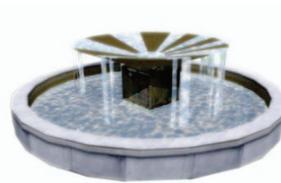
Une carte a été créée qui correspond à une vue aérienne de la ville. Les routes, rues piétonnes et l'emprise des bâtiments sont visibles. Sur la carte test, trois repères (mairie, tour bleue et boulangerie) sont signalés graphiquement par une icône spécifique (drapeau, carré bleu et pain).

- Reconnaissance visuelle des repères

L'entraînement à l'épreuve de reconnaissance des repères est composé de cinq images: deux items **cibles** (i.e. provenant de l'itinéraire), un **distracteur similaire** (i.e. item ayant une même dénomination qu'un repère mais visuellement différent) et deux **distracteurs différents** (i.e. items verbalement et visuellement différents des repères). Le test comporte 34 images différentes : 15 repères, leurs 15 équivalents similaires et quatre distracteurs différents. Un exemple est présenté en Figure 13. Chaque image était associée à sa dénomination orale préenregistrée.



Cible (Identique)



Distracteur similaire



Distracteur différent

Figure 13 : Exemple d'une image cible, similaire et différent

- Vérification de phrases

Le test de vérification de phrases est composé de quatre phrases pour l'entraînement et de deux versions de dix-huit phrases pour la phase test, présentées oralement sur un ordinateur (Annexe 2, tableau B). Dans chaque version il y a 9 phrases correctes et 9 phrases incorrectes. Pour chaque phrase correcte d'une version, une phrase équivalente mais incorrecte existe dans l'autre version et donc pour chaque phrase incorrecte d'une version, il existe son équivalent correct dans l'autre version (soit un total de 36 phrases). Chaque phrase inclut une *préposition spatiale* et un ou deux *repères*. Les repères sont utilisés au maximum deux fois par version. Des distracteurs sont également présents. Les prépositions spatiales utilisées sont : « devant », « derrière », « entre », « au bout de », « à gauche » et « à droite ». Chaque préposition est présentée dans trois affirmations par version. Pour la moitié des phrases, le sujet est *statique* (« être », « avoir », « se trouver »), pour l'autre moitié il est *dynamique* (« passer », « traverser »).

Exemple d'une phrase correcte versus son équivalent incorrect :

- « Un marchand de légumes se trouvait à gauche de la route. » Vrai
- « Un marchand de légumes se trouvait à droite de la route. » Faux

Ici, le repère principal utilisé est « un marchand de légumes » accompagné du verbe statique « se trouver » et de la préposition spatiale « à gauche/droite ».

• Choix de direction

Des photographies de deux intersections pour l'itinéraire d'entraînement et des 11 les plus distinctes pour l'itinéraire test ont été extraites. Les photographies ont été prises du point de vue d'un piéton et des flèches indiquant les directions possibles (« tout droit », « à gauche » et/ou « à droite ») ont été insérées (ex. Figure 14).

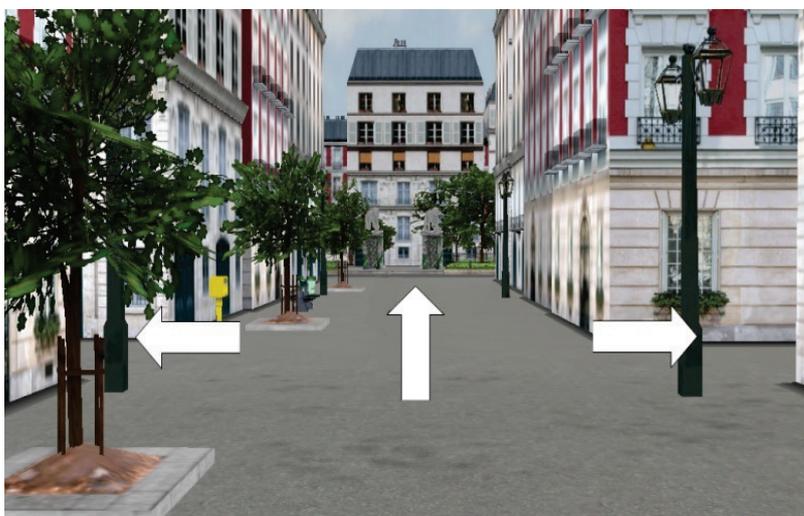


Figure 14 : Exemple de choix de direction de l'itinéraire test

• Choix du tracé de l'itinéraire

Le test de reconnaissance du tracé de l'itinéraire sur une carte (de type vue aérienne) est composé de quatre cartes pour la phase d'entraînement et de quatre autres cartes pour la phase de test (Figure 15). Les cartes représentent la même vue aérienne de la ville que la carte précédemment présentée (lors du tracé de l'itinéraire). Les quatre tracés d'itinéraires diffèrent d'une section de l'itinéraire (début, milieu ou fin). Il y a donc deux fins différentes (retrouvées dans deux tracés), deux milieux différents ou deux débuts différents.



Figure 15 : Choix entre l'itinéraire test et trois itinéraires distracteurs

3.2.3. *Epreuves complémentaires*

Afin de mesurer les habiletés cognitives et linguistiques, des épreuves complémentaires standardisées sont proposées (descriptif en Annexe 3). Elles ont été choisies afin d'être ludiques, variées et adaptées pour tous les groupes d'âge.

La capacité d'**attention sélective** est mesurée par le test de barrage de la NEPSY (Korkman et al., 2003).

Les capacités de **mémoire à court terme** et de **mémoire de travail** sont mesurées par le test d'empan *verbal* et *visuo-spatial* endroit et envers de la MEM-III (Wechsler, 2001) et le test du *buffer épisodique* (Picard et al., 2012).

Le test des flèches de la NEPSY (Korkman et al., 2003), mesure la **perception des directions**).

Le test de **compréhension de phrases C2** provenant de l'ELO (Khomsi, 2001) évalue la compréhension de phrases de structure plus ou moins complexe.

Le test de « la maison » (Hickmann et al., 2013) évalue la **production et la compréhension de prépositions spatiales et de verbes de mouvement**.

L'ENNI (Schneider et al., 2005) évalue les habiletés de **production narrative**.

Enfin, le test de **rotation mentale** (MRT, Vandenberg & Kuse, 1978) évalue la capacité de manipulation mentale d'une information visuelle

3.3. Procédure

Le recueil des données est réalisé par un unique expérimentateur, dans une salle calme. La passation des adultes est réalisée en une seule session d'une heure trente, alors que la passation des enfants est réalisée dans l'école du/de la participant(e), au cours de deux ou trois sessions suivant la fatigue du participant (une session pour l'itinéraire d'environ 45 minutes et une ou deux sessions de 30 à 45 minutes pour les épreuves complémentaires). La participation des volontaires est effectuée après une présentation de l'étude et après avoir reçu par écrit le consentement libre et éclairé de la personne et d'un ou plusieurs représentant(s) légal(aux). Le protocole est composé du questionnaire préalable, de la phase d'entraînement, de la présentation de l'itinéraire suivie des différentes tâches de restitution, puis de l'évaluation des habiletés visuo-spatiales et langagières.

3.3.1. *Présentation des itinéraires*

Après une introduction du protocole au travers d'une petite histoire, la phase d'entraînement et la phase expérimentale suivent la même procédure. Elle consiste en une étape d'encodage de l'itinéraire suivie d'une étape de restitution du trajet. Installés face à l'écran d'un ordinateur, les participants regardent une vidéo d'un itinéraire dans une ville virtuelle (itinéraire d'entraînement ou de test). Des pré-tests sur douze adultes ont montré que deux présentations étaient nécessaires et suffisantes pour construire une représentation de l'environnement. Il est demandé au/à la participant(e) de se souvenir de la vidéo et du maximum d'éléments qu'ils auront vus.

3.3.2. *Restitution du trajet*

La restitution du trajet comporte six épreuves incluant des productions et reconnaissances verbales et visuo-spatiales. Les épreuves mesurant la représentation spatiale de l'itinéraire sont présentées dans un ordre fixe (Figure 16) qui a été choisi afin de limiter les influences entre les tests, avec les tests de type production (description verbale et tracé) avant les tests de type reconnaissance, et les tâches liées aux repères avant celles concernant les directions intégrant des repères.



Figure 16 : Ordre de présentation des épreuves concernant les itinéraires

La première épreuve (1) est une description verbale de l'itinéraire. La seconde (2) est un tracé de l'itinéraire sur une carte, accompagné du rappel des repères et de leur position sur la carte. La troisième (3) est une tâche informatisée de reconnaissance visuelle des repères. La quatrième (4) est une tâche informatisée de vérifications d'affirmations. La cinquième (5) est une tâche informatisée de choix de directions. La sixième et dernière épreuve de restitution du trajet (6) est une tâche de reconnaissance du tracé de l'itinéraire sur une carte.

- (1) Description verbale de l'itinéraire

Le/la participant(e) doit expliquer l'itinéraire, avec un maximum de détails, à quelqu'un qui ne connaît pas la ville afin que cette personne puisse refaire le chemin sans se tromper et sans demander de l'aide à quelqu'un (consigne en Annexe 1). Des phrases de relances étaient fixées, afin de favoriser la production des enfants (Annexe 1).

- (2) Tracé de l'itinéraire

Suite à la description verbale, le/la participant(e) doit tracer sur une carte le trajet vu au cours de la vidéo. Les routes et trois repères leur sont indiqués visuellement et oralement (« là, il y a la mairie »). Le/la participant(e) doit également indiquer oralement et placer tous les repères dont il se souvient sur cette carte. Le nombre de repères et leur emplacement sont cotés.

- (3) Reconnaissance visuelle des repères

Le/la participant(e) doit reconnaître les images d'éléments de l'itinéraire (images cibles) parmi des images distracteurs similaires et des distracteurs différents. Le/la participant(e) doit appuyer sur la touche verte (touche « A ») si l'image a été vue au cours de l'itinéraire et sur la touche rouge (touche « P ») s'il ne l'a pas vue. Chaque participant(e) voit 15 images présentées aléatoirement à l'aide du logiciel E-Prime-2 : 7 images cibles, 4 images reliées (choisies parmi

les 8 restantes) et 4 images non-reliées. Chaque participant(e) ne voyant que 15 images (7 cibles, 4 reliées et 4 non-reliées), un contrebalancement des images présentées est réalisé (4 versions, Annexe 2). L'expérimentateur présente les images une à une sur l'ordinateur jusqu'à l'obtention de la réponse du/de la participant(e) et nomme chaque image au moment de son apparition sur l'écran.

- (4) Vérification de phrases

Chaque participant est affecté à une des deux listes de 18 phrases. Il entend la série des phrases présentées dans l'ordre de déroulement de l'itinéraire et doit indiquer pour chacune si elle est correcte, en appuyant sur la touche verte du clavier (touche « A ») ou incorrecte, en appuyant sur la touche rouge du clavier (touche « P »). Lorsque le/la participant(e) ne sait pas, il/elle peut répondre « je ne sais pas » (touche espace comportant une étiquette « ? »). La phrase est répétée jusqu'à l'obtention de la réponse du/de la participant(e).

- (5) Choix de direction

A l'aide du logiciel E-Prime, chaque carrefour est présenté un à un dans l'ordre d'apparition de l'itinéraire. En utilisant les flèches du clavier, les participants doivent indiquer la direction prise au cours de l'itinéraire. L'image de l'intersection suivante est présentée suite à la réponse. En cas d'erreurs, celles-ci ne sont pas signalées.

- (6) Choix du tracé de l'itinéraire

Les participants doivent choisir l'itinéraire vu parmi quatre parcours différents tracés sur des cartes. Ils indiquent oralement leur choix à l'expérimentateur.

3.3.3. *Epreuves complémentaires*

Afin de mesurer les habiletés cognitives et linguistiques, des épreuves complémentaires standardisées sont proposées. L'ensemble des participants réalise une épreuve d'attention visuelle entre l'itinéraire d'entraînement et celui de test. Après les épreuves tâches de l'itinéraire, les participants réalisent les trois épreuves de mémoire de travail puis celle de perception des directions. Enfin, les enfants réalisent une épreuve de compréhension de phrases, une épreuve de production et compréhension de prépositions spatiales et de verbes de mouvement et une épreuve

de production narrative. Les adultes réalisent une épreuve de rotation mentale. La procédure de chaque test est présentée en Annexe 3.

4. Traitement des données

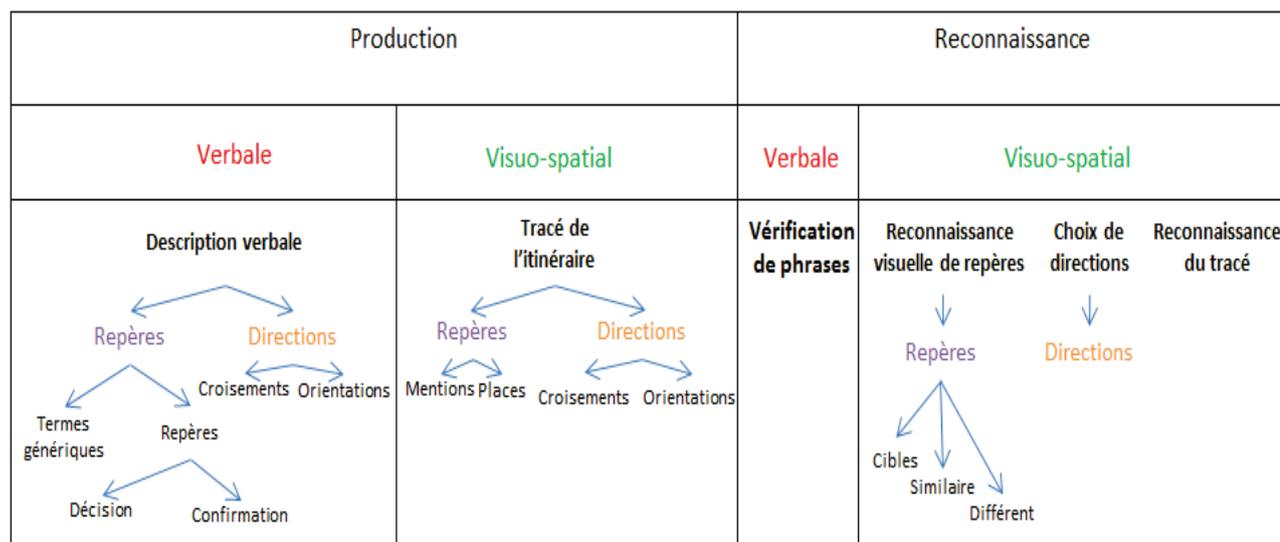


Figure 17 : Organisation des mesures de représentation spatiale

Dans cette expérience, des données de production et de reconnaissance sont analysées à partir d'informations verbales et visuo-spatiales (Figure 17). L'ensemble des analyses se focalisent sur deux informations principales: les repères et les directions.

○ Les descriptions verbales ont été transcrites puis codées avec le programme CLAN (voir un extrait de transcription et codage, Annexe 4). Trois aspects des productions ont été mesurés :

- la productivité verbale générale (loquacité) par groupe d'âge : nombre de mots produits lors de la description verbale de chaque participant puis moyenné par groupe d'âge
- la connaissance des repères (centrée sur les premières mentions) en fonction :
 - du déterminant nominal utilisé lors de la première mention d'un repère (défini versus indéfini)

Le nombre moyen de termes introduits par un déterminant défini ou indéfini est calculé par groupe d'âge. Une analyse plus fine est réalisée pour évaluer le choix adapté ou non de ce terme.

- du type de terme utilisé : générique versus repère

Le nombre moyen de *termes génériques* (i.e. éléments non spécifiques de l'itinéraire, par exemple des arbres) et de *repères* (i.e. éléments identifiables de l'itinéraire, par exemple la mairie) est calculé par groupe. Une analyse qualitative des termes utilisés est également réalisée.

- de la position du repère : décisionnel versus confirmatoire

Le nombre moyen de repère décisionnels (i.e. situé à un changement de direction avéré) et de repères confirmatoires (i.e. situé entre deux changements de directions) est compté par groupe.

- de sa contextualisation : repère mentionné avec versus sans l'expression d'une relation spatio-temporelle

Le nombre moyen de mentions de repères accompagnées ou non d'une préposition exprimant une relation spatiale (par exemple, *à côté, plus loin*) et/ou temporelle (par exemple, *après, avant*) est calculé par groupe d'âge.

Le ratio des prépositions mentionnées par groupe, c'est-à-dire le nombre de mentions d'une préposition spécifique (par exemple, *à côté*) divisé par le nombre moyen de mentions de préposition spatio-temporelle du groupe.

- la connaissance des directions : carrefours versus orientations

Le nombre moyen de carrefours (tel que « au croisement ») et d'orientations (par exemple « à droite ») corrects est calculé par groupe. Un score sur 14 évalue les carrefours et un score sur 14 les orientations (0 aucune mention, 14 toutes les carrefours ou toutes les orientations sont corrects).

- Cotation de la production sur carte :

- Le **tracé de l'itinéraire** : carrefours et orientations

Le nombre moyen de carrefours (score sur 14) et d'orientations (score sur 14) est calculé par groupe. Si une personne choisit de tourner à droite au premier croisement de route alors qu'il fallait tourner à droite seulement au deuxième, la personne n'obtient pas le point de croisement mais obtient un point d'orientation pour le 2^{ème} croisement. A contrario, si la personne a bien changé de direction au premier carrefour mais a tourné à gauche, elle obtient le point de carrefours mais pas celui d'orientation. Cela permet de considérer juste des croisements et des choix d'orientation malgré une erreur initiale tout en prenant en compte cette erreur.

- le **rappel et placement des repères**

Le nombre moyen de repères corrects cités et le nombre d'indications correctes d'emplacement sont également comptabilisés par groupe d'âge.

- Le test de **reconnaissance des repères** est analysé suivant le type d'image (cibles, distracteurs similaires et distracteurs différents).

La variable **mesurée est la fréquence de** réponses correctes pour chaque type d'images. Pour les images *cibles*, cela correspond à une fréquence de reconnaissances correctes (nombre de cibles acceptées/ nombre de cibles présentées). Pour les images *distracteurs différents* et *similaires* cela correspond à un taux de rejets corrects (respectivement, nombre de *distracteurs différents rejetés*/ nombre de distracteurs différents présentés et nombre de *distracteurs similaires rejetés*/ nombre de distracteurs similaires présentés). Des analyses sont réalisées sur les moyennes de fréquences de réponses correctes par groupe.

- La variable mesurée à l'épreuve de **vérification d'affirmations** est la fréquence de bonnes réponses comprenant l'acceptation des phrases correctes et le rejet des phrases incorrectes. La fréquence de réponses correctes est enregistrée par participant(e) (Nombre de réponses correctes/ (nombre de phrases présentées-nombre de réponses « je ne sais pas »)). Des analyses sont réalisées sur les moyennes de fréquences de réponses correctes, par groupe d'âge.

- La variable mesurée à l'épreuve de **choix de direction** est la fréquence de choix corrects par participant(e) (Nombre de réponses correctes/ nombre d'images présentées c'est-à-dire sur onze). Des analyses sont réalisées sur les moyennes, par groupe d'âge, de fréquences de réponses correctes.

Notons que le nombre de choix possibles par carrefour étant de deux à trois réponses selon les items, le taux de réponses au hasard se situe à 0,37.

- A l'épreuve de **choix du tracé de l'itinéraire**, chaque participant(e) obtient un score de 0 pour une réponse incorrecte ou 1 pour une réponse correcte. Des analyses sont réalisées sur les moyennes de réponses correctes (sur 1 point), par groupe d'âge.

5. Hypothèses opérationnelles

Notre étude du développement des représentations spatiales d'itinéraires virtuels est centrée sur trois axes principaux :

- Le développement des connaissances spatiales de type repère, route et survol
- Le rôle du format de restitution
- Le lien entre la représentation spatiale et les habiletés cognitives et langagières

1/ Le développement des connaissances spatiales

Les connaissances concernant les itinéraires impliquent le traitement d'informations visuelles, spatiales et verbales. L'une de nos hypothèses est que les enfants devraient devenir capables de traiter de plus en plus d'informations et de façon de plus en plus précise. Ainsi, le nombre de repères et de directions mentionnés dans la description verbale, indiqués sur la carte et reconnus devrait augmenter avec l'âge.

Une augmentation de la qualité de la représentation est également attendue. Ainsi, dans la description verbale, le nombre de repères devrait augmenter alors que le nombre de termes génériques devrait diminuer. Leur introduction par un déterminant adapté devrait augmenter. Par ailleurs, les informations devraient être de plus en plus reliées entre elles. Cela implique une augmentation du nombre de mentions de relations spatio-temporelles et celles-ci devraient devenir de plus en plus variées et adaptées.

On attend aussi une évolution dans la sélection des repères : avec l'âge, les enfants devraient apprendre à utiliser plus souvent les repères décisionnels.

2/ Le rôle du format des mesures

Alors que les enfants s'appuieraient principalement sur un codage visuo-spatial, les adultes utiliseraient un double codage (verbal et visuel). Les enfants devraient donc avoir plus de facilité dans les tâches visuo-spatiales alors que les adultes ne devraient pas être influencés par le format verbal ou visuel de la tâche. Cette augmentation de l'utilisation d'un codage verbal pourrait être signalée par une augmentation d'un biais de dénomination dans la tâche de

reconnaissance visuelle des repères c'est-à-dire une augmentation du nombre de distracteurs similaires reconnus à tort.

3/ Le lien entre la représentation spatiale et les habiletés cognitives et langagières

Enfin, nous nous attendons à observer un lien entre la connaissance spatiale de l'itinéraire et les habiletés cognitives et langagières. L'ensemble ou la majorité des mesures spatiales devraient augmenter avec les capacités d'attention. Par ailleurs, les mesures verbales de l'itinéraire devraient augmenter avec les capacités langagières alors que les performances aux tâches visuo-spatiales devraient augmenter avec les habiletés non verbales.

6. Analyses statistiques

Des analyses de variance à effet principal (groupe, 4 modalités) ont été réalisées sur chaque variable dépendante non appariée décrite précédemment. Une analyse multi-variée à mesures répétées a été réalisée afin de comparer les effets inter-groupes (groupe, 4 modalités) et les effets intra-groupes des variables dépendantes appariées (2 ou 3 conditions selon la tâche). Pour chaque effet principal significatif, la part de variance expliquée est indiquée par l'éta carré (η^2). Un test post hoc de Fisher a été ajouté afin de préciser la présence ou non de différences significatives entre deux groupes d'âges concomitants (GSM et CE1, CE1 et CM1, CM1 et Adultes) et entre conditions.

Enfin, des corrélations de *Bravais-Pearson* ont été réalisées entre les scores aux différentes épreuves de l'itinéraire et entre les performances aux épreuves et aux tests cognitifs. Un contrôle de l'âge dans l'analyse de ces corrélations a permis d'observer la présence ou non de liens entre les épreuves en tenant compte de l'évolution avec l'âge. Une correction de Bonferroni est réalisée.

7. Résultats

7.1. Performances aux épreuves de l'itinéraire

Une première analyse concernant les descriptions verbales vise à prendre en compte la loquacité relative des participants afin d'éliminer l'impact possible de cette variable sur les dimensions analysées. En effet, un participant loquace a plus de chance de fournir des informations utiles (par exemple, mentions des repères et de leur localisation) qu'un participant qui ne l'est pas. La variable dépendante utilisée est le nombre de mots produit au cours de la description. L'ANOVA à facteur principal 4 (âge) permet de mettre en évidence un effet de l'âge ($F(3,75)=11,53$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,32$). Les enfants de GSM produisent significativement moins de mots que les enfants de CM1 ($x=149,45$; $SE=50,35$ vs. $x=305,58$; $SE=54,19$; $p<0,05$) et que les adultes ($x=149,45$; $SE=50,35$ vs. $569,45$; $SE=52,81$; $p<0,0001$) et les enfants de CE1 ($x=271,94$; $SE=55,67$) et de CM1 ($x=305,58$; $SE=54,19$) produisent moins de mots que les adultes ($p<0,001$).

7.1.1. *Connaissances des repères*

A) Description de l'itinéraire : les mentions de repères

- Analyse des termes utilisés

Les termes désignant des éléments de l'environnement ont été tout d'abord classifiés en termes « génériques » (i.e. éléments non spécifiques) ou « repères » (i.e. éléments spécifiques, identifiables par des informations sur leur saillance, leur fonction ou leur localisation). On trouve ainsi 10 termes génériques et 30 repères différents mentionnés par au moins deux participants (Annexe 2).

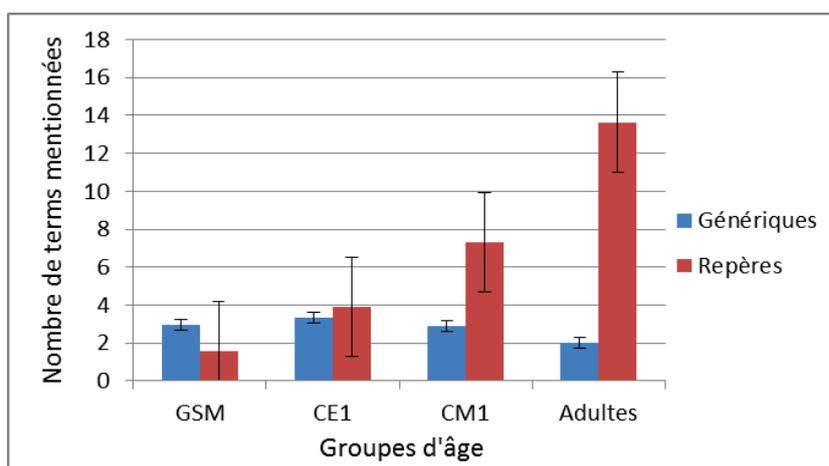


Figure 18 : Nombre moyen de termes génériques et de repères mentionnés au cours de la description, par groupe d'âge

L'ANOVA à mesures répétées, présentée Figure 18, avec le facteur Age à 4 modalités et le facteur intra type de terme à 2 modalités, a révélé une différence significative entre les groupes d'âge montrant une augmentation dans les mentions de **termes** (repères-génériques) avec l'âge ($F(3,75)=39,02$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,61$). Une différence significative du type de terme utilisé est observée ($F(1,75)=93,56$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,56$), les repères étant plus utilisés que les termes génériques. Enfin, une interaction significative type*âge ($F(3,75)=53,62$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,68$) est observée. L'analyse post-hoc permet d'observer que : alors que les plus jeunes enfants mentionnent autant de termes génériques que de repères ($p>0,05$), les enfants de 10 ans ($p<0,0001$) et les adultes ($p<0,0001$) mentionnent plus de repères. Le nombre de termes génériques ne diffère pas entre les différents groupes mais le nombre de repères augmente progressivement entre les GSM et les CE1 ($p<0,01$), les CE1 et les CM1 ($p<0,0001$), les CM1 et les adultes ($p<0,0001$).

La capacité à introduire les repères est mesurée par l'utilisation des déterminants nominaux et par l'utilisation ou non de prépositions spatio-temporelles, ainsi que par le type d'expression sur le plan plus qualitatif. Les déterminants considérés comme appropriés pour l'introduction des référents incluent les déterminants indéfinis (« une poste ») et numériques (« deux arbres ») par opposition aux déterminants définis (« l'arbre ») qui présupposent l'existence et l'identité des référents et sont donc réservés au maintien de la référence. L'Anova à mesures répétées sur les ratios de type de déterminants appropriés met en évidence un effet du type de déterminant ($F(1,77)=115,752$; $p<0,0001$) mais aucun effet significatif de l'âge ($F(3,77)=1,70$; $p=0,17$) ou d'interaction type*âge ($F(3,77)=2,50$; $p=0,07$) n'est observé.

L'ensemble des participants utilisent les articles définis pour introduire les « vecteurs » (sur lequel est réalisé le mouvement) comme la « route », le « trottoir » ou le « passage piétons ». Quelques GSM, des CE1, CM1 et adultes utilisent les articles définis également pour introduire des éléments plus spécifiques comme la porte d'arrivée ou certains éléments symboliques comme « la poste », « la mairie » ou « la gare ». Notons que dans le discours quotidien, l'existence et l'identité de tels référents peuvent être souvent supposées même lors de leur première mention (« la route » peut constituer une référence générale au trajet, plutôt qu'une référence à une route spécifique, et il n'y a en général qu'une gare ou qu'une poste dans un même quartier).

- Utilisation de prépositions spatio-temporelles avec les repères

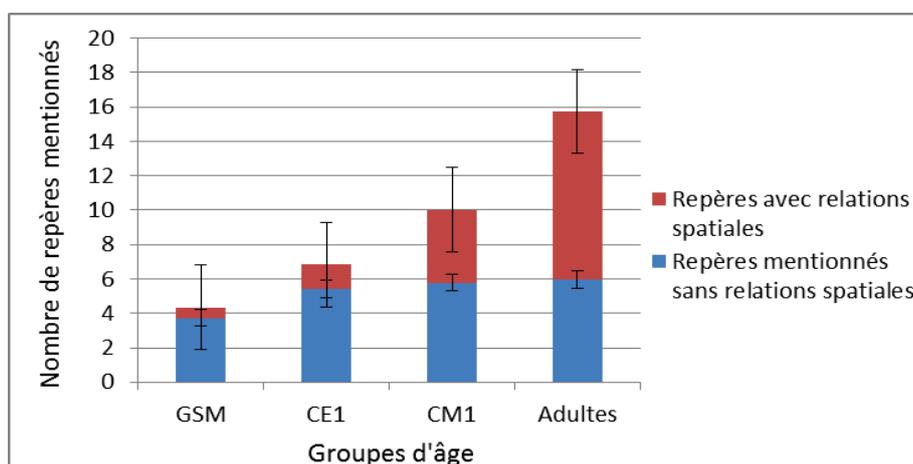


Figure 19 : Nombre moyen de repères mentionnés avec vs sans préposition spatiale au cours de la description, par groupe

L'ANOVA à mesures répétées sur le nombre de repères mentionnés « avec » versus « sans » préposition spatiale, illustrée Figure 19, met en évidence une différence entre les groupes d'âges ($F(3,75)=40,52$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,62$), entre la mention de repères « avec » versus « sans » préposition spatiale ($F(1,75)=7,45$; $p<0,01$; $\eta^2=0,09$) et une interaction entre les âges et l'utilisation de prépositions spatiales ($F(3,75)=9,24$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,27$). Alors que le nombre de mentions de repères utilisés sans préposition spatiale ne change pas avec l'âge, le nombre de repères accompagnés de préposition spatiale augmente avec l'âge. Les GSM ($p<0,01$) et les CE1 ($p<0,001$) mentionnent plus de repères sans préposition spatiale que de repères accompagnés de préposition spatiale, alors que les adultes mentionnent majoritairement des repères avec préposition spatiale ($p<0,01$). Les GSM ne présentent pas de résultats significativement

différents des CE1. Les CE1 mentionnent moins de repères avec préposition spatiale que les CM1 ($p < 0,01$) qui en mentionnent moins que les adultes ($p < 0,0001$).

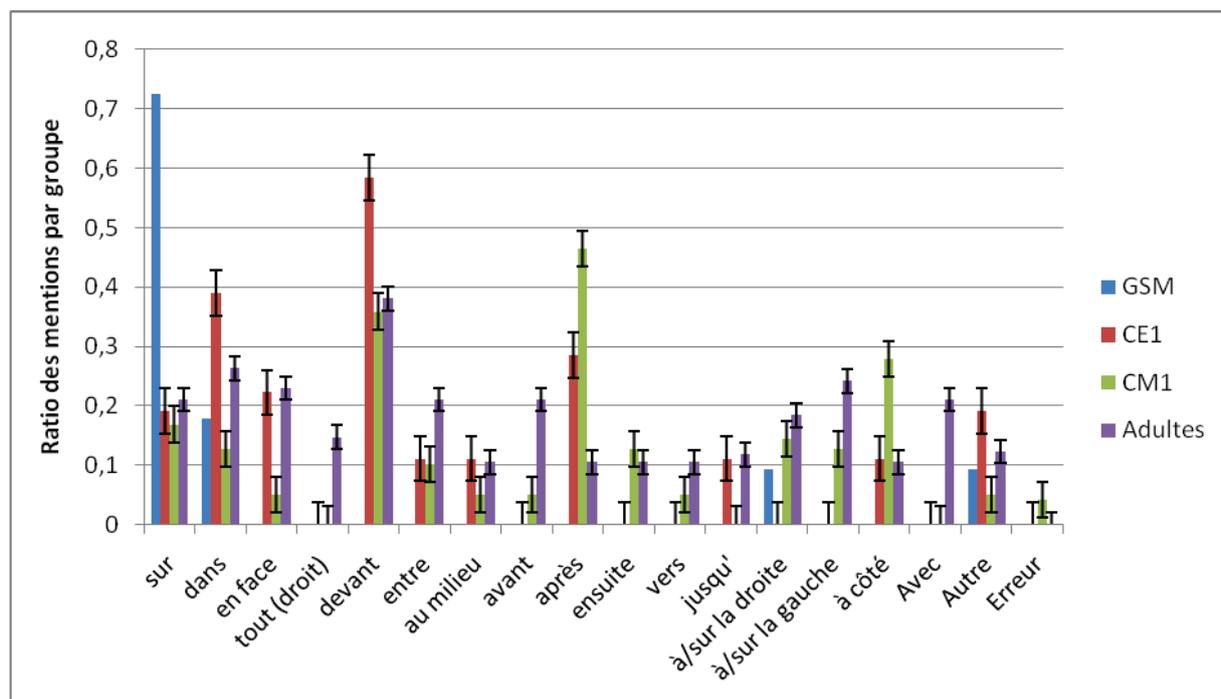


Figure 20 : Ratio par groupe des prépositions spatiales mentionnées dans la description verbale

Une analyse plus qualitative a examiné les types d'expressions utilisées lors des mentions de repères, présentée dans la Figure 20. Nous pouvons observer que les GSM utilisent en grande majorité (73%) la préposition spatiale « sur » et parfois « dans », indiquant une position centré sur l'individu : ex. « sur le passage piéton ». Les CE1 utilisent principalement la préposition « devant » (58%) mais également des expressions comme « dans », « en face de » ou « après »... Ils utilisent donc des prépositions plus variées, indiquant des positions spatiales et temporelles fixées sur le participant ou les éléments de l'itinéraire. Les CM1 utilisent principalement l'expression temporelle « après » (46%) mais également les expressions « devant », « à côté », « à droite/ à gauche ». Les enfants de CM1 utilisent donc des expressions spatiales et temporelles mettant en lien le participant avec un élément ou un mouvement et indiquant une succession temporelle qui suit le déroulement du déplacement au cours de l'itinéraire. Enfin, les adultes utilisent une grande variété d'expressions spatiales et temporelles comme « devant », « dans », « sur », « entre », « avant », « à gauche/ à droite » mettant en lien le participant avec un élément ou un mouvement et reliant plusieurs éléments entre eux.

- Influence du rôle des repères : Décisionnels vs confirmatoires

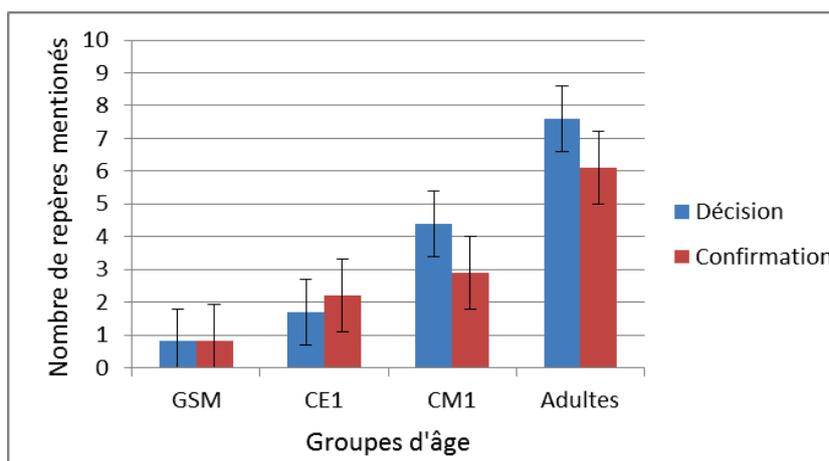


Figure 21 : Nombre moyen de repères décisionnels versus confirmatoires mentionnés au cours de la description, par groupe

Une analyse, présentée Figure 21, examine le rôle des repères selon leur position au cours du trajet. Les *repères décisionnels* sont adjacents à un changement d'orientation alors que les *repères confirmatoires* sont adjacents à un carrefour sans changement d'orientation ou ne sont pas situés à un carrefour. 15 repères décisionnels et 15 repères confirmatoires différents sont cités dans au moins une des descriptions.

L'ANOVA à mesures répétées sur le nombre de repères décisionnels vs. confirmatoires, met en évidence une différence entre les groupes d'âge ($F(3,75)=61,35$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,71$), entre la position des repères mentionnées ($F(1,75)=8,52$; $p<0,01$; $\eta^2=0,10$) et une interaction entre le groupe d'âge et la position des repères ($F(3,75)=6,02$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,19$). Les repères décisionnels ($x=3,60$; $SE=0,22$) sont plus souvent mentionnés que les repères confirmatoires ($x=3,01$; $SE=0,17$). Les GSM ($p>0,05$) et CE1 ($p>0,05$) mentionnent autant de repères décisionnels que de repères confirmatoires, alors que les CM1 ($p<0,001$) et les adultes ($p<0,001$) mentionnent plus de repères décisionnels que de confirmatoires. Les GSM mentionnent autant de repères décisionnels que les CE1 ($p > 0,05$) mais moins de repères confirmatoires ($p<0,05$). Les CE1 mentionnent autant de repères confirmatoires que les CM1 ($p>0,05$) mais moins de repères décisionnels ($p<0,0001$). Les CM1 mentionnent moins de repères confirmatoires ($p<0,0001$) et décisionnels ($p<0,0001$) que les adultes.

En conclusion, cela permet de mettre en évidence une augmentation de la qualité et quantité des mentions et des introductions des repères dans les descriptions verbales avec l'âge.

B) Mentions et placements des repères sur une carte

Le nombre de repères mentionnés et de positions de repères indiqués ont été calculés par individu puis moyennés par groupe d'âge. L'analyse porte sur une moyenne des indications et des placements des repères pour chaque groupe d'âge.

• Repères cités

L'ANOVA du facteur principal groupes d'âge sur le nombre de repères indiqués avec la carte met en évidence l'existence de différences entre les âges ($F(3,75)=49,56$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,66$). Les GSM indiquent moins de repères que les CE1 (GSM : $x=0,55$; $SE=0,97$ vs. CE1 : $x=1,89$; $SE=1,88$; $p<0,05$), qui en indiquent moins que les CM1 (CE1 : $x=1,89$; $SE=1,88$ vs. CM1 : $x=3,55$; $SE=2,42$; $p<0,05$). Ces indications de repères sont aussi moins fréquentes pour les CM1 que pour les adultes (CM1 : $x=3,55$; $SE=2,42$ vs adultes : $x=7,45$; $SE=2,19$; $p<0,0001$).

• Repères placés

L'ANOVA sur le nombre de placements corrects des repères sur la carte révèle l'existence d'une différence entre les groupes d'âge ($F(3,75)=37,70$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,60$). Les GSM placent autant de repères que les CE1 (GSM : $x=0,14$; $SE=0,47$ vs CE1 : $x=1,00$; $SE=1,57$; $p>0,05$), qui en placent autant que les CM1 (CE1 : $x=1,00$; $SE=1,57$ vs. CM1 : $x=2,16$; $SE=2,48$; $p=0,08$), mais les CM1 en placent moins que les adultes (CM1 : $x=2,16$; $SE=2,48$ vs. adultes : $x=6,20$; $SE=2,64$; $p<0,0001$).

Nous observons donc un effet plancher chez les GSM puis un développement entre les GSM et les CE1 permettant à la majorité des participants de citer quelques repères sur une carte, mais seule une minorité arrive à placer des repères. Cette tâche semble encore difficile et ce n'est qu'à partir du CM que pratiquement tous les participants réussissent à citer et à placer au moins un repère. Le développement entre l'enfance et l'âge adulte permet de citer et placer plus de repères sur une carte et ainsi de fournir des indications plus riches.

C) Reconnaissance des repères :

L'analyse de la reconnaissance visuelle des repères est basée sur le taux de réponses correctes pour chaque type d'images (nombre de réponses correctes / nombre de réponses totales) : images cibles (repères de l'itinéraire), distracteurs similaires (i.e. éléments ayant une dénomination similaire à une cible mais visuellement différents) et des distracteurs différents (i.e. éléments dont la dénomination et les informations visuelles sont différentes de celles des images cibles).

Les performances au test de reconnaissance des repères (Figure 22) présentent une augmentation de la reconnaissance des items cibles et des rejets corrects des distracteurs différents. Notons toutefois que les performances des enfants les plus jeunes sont proches du hasard (50 %), la variabilité intra-groupe étant faible. Les GSM et les CE1 ont une tendance au rejet.

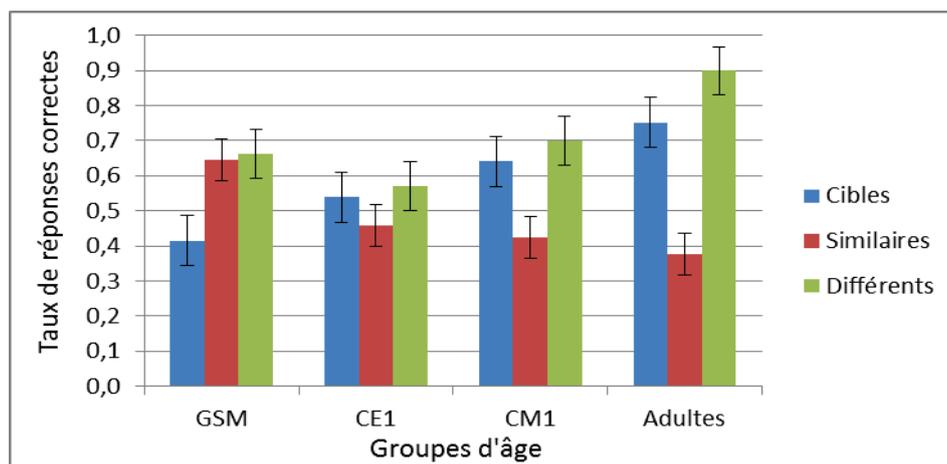


Figure 22 : Ratio de reconnaissances et rejets corrects des items par classe d'âge

L'ANOVA à mesures répétées sur le taux de réponses correctes des images, présentée Figure 22, révèle un effet du groupe d'âge ($F(3,75)=5,11$; $p<0,01$; $\eta^2=0,17$), du type d'images ($F(2,150)=19,36$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,21$) et une interaction entre le groupe- d'âge et le type d'images ($F(6,150)=7,03$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,22$). Le taux de réponses correctes des GSM aux items cibles est inférieur à celui des items similaires ($p<0,01$) et différents ($p<0,01$) ; le taux de celui des CE1 ne diffère pas en fonction du type d'item ($p>0,05$) ; mais celui des CM1 aux items similaires est inférieur à celui des items cibles ($p<0,01$) et différents ($p<0,001$). Enfin, le taux de réponses correctes des adultes aux items similaires est également inférieur à celui des items cibles ($p<0,0001$) et différents ($p<0,0001$), le taux de réponses correctes aux items cibles étant inférieur à celui des items différents ($p<0,05$). De plus, le taux de réponses correctes des GSM

aux items similaires est supérieur à celui des CE1 ($p<0,05$) ; et celui des CM1 pour les items différents est inférieur à celui des adultes ($p<0,01$).

Au cours du développement, les capacités de reconnaissance des repères augmentent mais alors que le nombre de reconnaissances correctes des images-cibles et que le nombre de rejets corrects des distracteurs différents augmente avec l'âge, le nombre de rejets corrects diminue pour les items similaires. Les GSM semblent répondre « non-vu » aux trois types d'items et les CE semblent répondre au hasard. Les CM et les adultes réussissent à distinguer les items cibles des items distracteurs différents. Par ailleurs, on observe une augmentation avec l'âge des fausses reconnaissances des items similaires, qui sont de plus en plus considérés comme ayant été vus.

7.1.2. *Connaissances de la route*

A) Mention des directions au cours des descriptions verbales

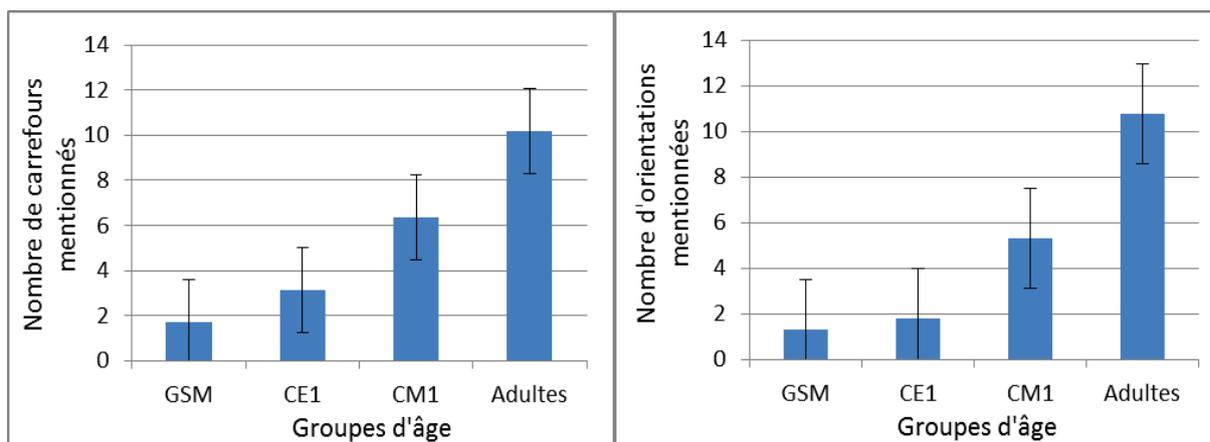


Figure 23 : Nombres moyens de carrefours et d'orientations mentionnés au cours de la description verbale, par groupe d'âge

L'ANOVA, présenté Figure 23, concernant le nombre de mentions des carrefours met en évidence un effet significatif du facteur Age ($F(3,71) = 27,78$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,54$). Les GSM mentionnent autant de carrefours que les CE1 ($p>0,05$), mais les CE1 en mentionnent moins que les CM1 ($p<0,01$) qui en mentionnent moins que les adultes ($p<0,001$).

L'ANOVA montre un effet significatif de l'âge sur le nombre de mentions d'orientations ($F(3,71)=44,64$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,65$). Les GSM mentionnent autant de carrefours

que les CE1 ($p > 0,05$, mais les CE1 en mentionnent moins que les CM1 ($p < 0,001$) qui en mentionnent moins que les adultes ($p < 0,0001$).

Le groupe des CM1 se caractérise par une grande hétérogénéité, certains des enfants faisant preuve de performances équivalentes à la moyennes des adultes, alors que d'autres font preuve de performances correspondant à la moyenne des enfants de CE1. Avant cet âge, on observe un effet plancher pour les GSM et les CE ; puis un développement progressif entre le CE et l'âge adulte. Indiquer des directions semble donc très difficile et cette capacité n'émerge qu'entre le CE1 et le CM1.

B) Indication des directions sur une carte

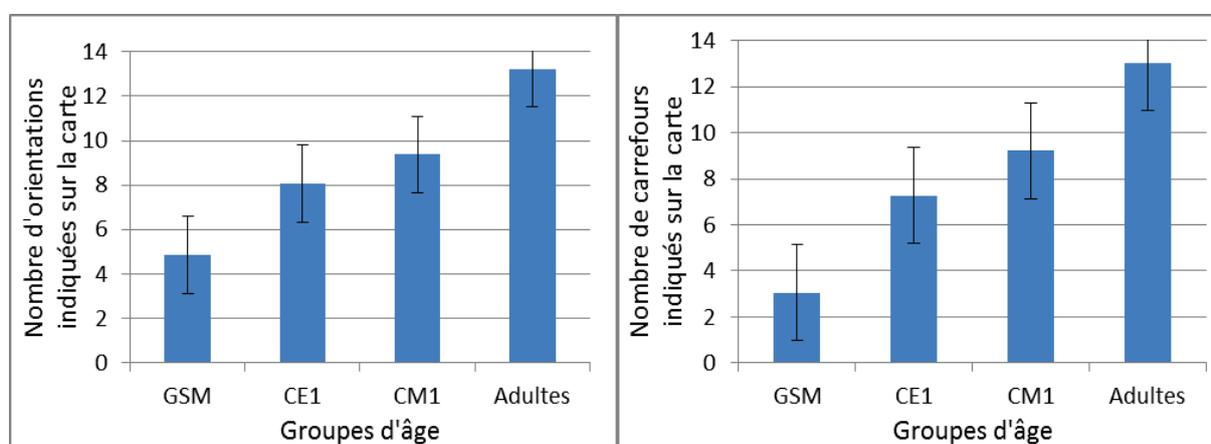


Figure 24 : Nombres moyens de carrefours et d'orientations correctement indiqués sur la carte, par groupe d'âge.

L'ANOVA sur le nombre d'indications corrects de carrefours sur la carte (Figure 24) révèle l'existence d'une différence entre les groupes d'âge ($F(3,71) = 52,51$; $p < 0,0001$; $\eta^2 = 0,69$). Les GSM indiquent moins de carrefours que les CE1 ($p < 0,0001$), qui en indiquent moins que les CM1 ($p < 0,05$) ; de même les CM1 en indiquent moins que les adultes ($p < 0,0001$).

L'ANOVA sur le nombre d'indications correctes d'orientations sur la carte révèle aussi l'existence d'une différence entre les groupes d'âge ($F(3,71) = 39,81$; $p < 0,0001$; $\eta^2 = 0,63$). Les GSM indiquent moins d'orientations que les CE1 ($p < 0,0001$), qui en indiquent autant que les CM1 ($p > 0,05$) ; de même, les CM1 en indiquent moins que les adultes ($p < 0,0001$).

La majorité des GSM ont des difficultés pour réaliser un tracé correct de l'itinéraire sur la carte. L'indication des directions reste difficile jusqu'au CM. La précision dans cette tâche émerge principalement entre les CM et l'âge adulte. Notons que le score moyen d'indication des

directions des adultes est proche du score maximal (de 14 par mesure) avec une variance intra-groupe faible, c'est à dire que la majorité des adultes réalisent un tracé parfait ou avec uniquement une ou deux erreurs minimales. Enfin, précisons que les indications de directions sont mieux réussies dans le tracé de la carte qu'au cours de la description verbale.

C) Reconnaissance des affirmations correctes

L'analyse des performances au test d'affirmations est basée sur le taux de réponses correctes moyen par groupe d'âge (les réponses « je ne sais pas » étant exclues).

Les performances au test des affirmations sont homogènes mais assez faibles (GSM : $x=0,50$; $SE=0,04$; CE1 : $x=0,52$; $SE=0,04$; CM1 : $x=0,52$; $SE=0,04$ et adultes : $x=0,56$; $SE=0,04$). L'ANOVA sur le taux de réponses correctes aux affirmations ne révèle pas de différence significative entre les groupes d'âge ($F(3,75)=0,61$; $p=0,60$; $\eta^2=0,02$).

D) Reconnaissances des directions correctes

L'ANOVA sur le taux de reconnaissance des directions dans l'itinéraire révèle un effet significatif de l'âge ($F(3,75)=24,51$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,50$). Le taux de choix de directions correctes des GSM est inférieur à celui des CE1 (GSM : $x=0,48$; $SE=0,03$ vs ; CE1 : $x=0,68$; $SE=0,04$; $p<0,001$) qui ne diffère pas de celui des CM1 (CE1 : $0,68$; $SE=0,04$ vs. CM1 : $x=0,74$; $SE=0,04$; $p>0,05$) ; et celui des CM1 est inférieur à celui des adultes (CM1 : $x=0,74$; $SE=0,04$ vs. $x=0,90$; $SE=0,04$; $p<0,01$).

La capacité à choisir correctement les directions suivraient donc un développement par paliers : un premier développement a lieu tout d'abord entre les GSM et les CE1, puis un autre entre les CM1 et les adultes. Les performances intra-groupes sont homogènes. Les performances des enfants les plus jeunes sont légèrement supérieures au hasard, alors que les performances des adultes sont proches du maximum.

E) Reconnaissance du tracé correct sur une carte

L'ANOVA à facteur principal sur le taux de reconnaissance de l'itinéraire sur une carte révèle un effet significatif de l'âge ($F(3,75)=5,34$; $p<0,01$; $\eta^2=0,18$). Les scores moyens de reconnaissance du tracé sont assez faibles mais légèrement supérieurs au hasard (25%) chez les enfants (GSM et CE1) alors qu'ils sont proches du maximum chez les adultes. Le taux de réponses correctes ne diffère pas entre les GSM et les CE1 ($p>0,05$) ni entre les CE1 et les CM1 ($p>0,05$), mais celui est CM2 est inférieur à celui des adultes ($p<0,01$). L'acquisition de cette compétence semble donc se développer au cours de l'adolescence.

7.2. Analyses de corrélations entre les tâches sur l'itinéraire

Afin d'évaluer la nature multidimensionnelle de la représentation de l'itinéraire test, les relations entre les performances impliquant des formats différents (verbal vs visuel) et celles entre les connaissances des repères et des directions sont analysées (Tableau 1). Les mentions de termes génériques, les déterminants utilisés et les expressions spatiales ne sont pas inclus, ni les performances à l'épreuve des affirmations (effet plancher). Chaque mesure des épreuves de l'itinéraire présente des corrélations importantes avec l'âge. Afin de mieux cerner les différences individuelles indépendamment des progressions développementales, des corrélations partielles ont été réalisées en contrôlant l'âge et une correction de Bonferroni appliquée vu le nombre important de variables considéré (13 variables, $c=0,0038$ pour un $p<0,05$).

Tableau 1 : Corrélations partielles (contrôle de l'âge) entre les différentes connaissances de l'itinéraire (avec corrections de Bonferonni, corrélations significatives signalées en rouge)

		Description verbal			Cartographie				Reconnaissance des repères			Reconnaissance des directions	Reconnaissance de la carte
		Repères confirmatoires	Carrefours	Orientations	Mention des repères	Placement des repères	Carrefours	Orientation	Cibles	Distracteurs similaires	Distracteurs différents		
Description verbale	Repères décisionnels	0.51	0.50	0.53	0.59	0.49	0.39	0.39	0.21	-0.20	0.05	0.37	0.09
	Repères confirmatoires		0.12	0.10	0.52	0.32	0.33	0.27	0.17	-0.06	-0.20	0.21	-0.07
	Carrefours			0.82	0.37	0.40	0.30	0.29	0.17	-0.09	0.21	0.23	0.22
	Orientations				0.29	0.38	0.25	0.31	0.11	-0.07	0.14	0.19	0.25
Cartographie	Mention des repères					0.76	0.40	0.36	0.28	-0.17	-0.08	0.36	0.20
	Placement des repères						0.39	0.41	0.15	-0.07	0.00	0.30	0.33
	Carrefours							0.88	0.22	-0.25	0.04	0.40	0.27
	Orientations								0.17	-0.10	0.02	0.39	0.31
Repères reconnus	Cibles									-0.21	-0.13	0.11	-0.01
	Distracteurs similaires										0.09	-0.19	0.04
	Distracteurs différents											-0.18	0.10
Reconnaissance des directions													0.00

Le Tableau 1, nous permet d'observer que le nombre de repères décisionnels mentionnés au cours de la description verbale augmente avec le nombre de repères confirmatoires ($r=0,51$), de carrefours ($r=0,50$) et d'orientations ($r=0,53$) mentionnés dans cette même description ainsi qu'avec le nombre de repères indiqués ($r=0,59$), de repères placés ($r=0,49$), de carrefours ($r=0,39$) et d'orientations ($0,39$) correctement indiqués sur la carte. Enfin, il augmente avec le nombre de choix corrects des directions ($r=0,37$). Contrairement aux repères décisionnels, les repères confirmatoires augmentent uniquement avec le nombre de repères indiqués sur la carte ($r=0,52$). Le nombre de carrefours mentionnés au cours de la description verbale augmentent avec le nombre de mentions de repères décisionnels, de l'orientation à prendre aux carrefours ($r=0,82$) ainsi qu'avec le nombre de mentions ($r=0,37$) et de placements ($r=0,40$) de repères sur la carte. De même, le nombre d'orientations à une intersection augmente avec le nombre de repères ($0,53$) et de carrefours ($0,82$), et contrairement aux mentions des carrefours, uniquement avec le placement des repères ($r=0,38$).

Les performances à l'épreuve de la carte augmentent toutes simultanément mais alors que l'indication des repères sur la carte augmente également avec les repères mentionnés (repères décisionnels ; $r=0,59$; repères confirmatoires; $r=0,52$) et les carrefours ($r=0,37$) mentionnés au cours de la description ainsi qu'avec le nombre de directions correctement choisies ($r=0,36$); le nombre de placements indiqués augmente avec uniquement avec le nombre de repères décisionnels ($r=0,49$) et avec les carrefours ($r=0,39$) mais également les orientations ($r=0,39$) ; et les indications de carrefours et d'orientations sur la carte augmentent uniquement avec le nombre de repères décisionnels mentionnés et avec le nombre de carrefours reconnus.

Les performances de reconnaissance visuelle des repères et de reconnaissance de la carte ne sont corrélées à aucune autre performance de l'itinéraire.

Les analyses révèlent donc que seul le nombre de mentions des repères décisionnels et de reconnaissance des directions sont fortement liés aux autres épreuves verbales et visuelles. De plus, contrairement à nos hypothèses, les performances aux tests visuo-spatiaux ne sont pas spécifiquement reliées entre elles.

7.3. Analyses de corrélations entre les mesures de l'itinéraire et les mesures d'habiletés cognitives et linguistiques

Afin de déterminer les liens entre les connaissances de l'itinéraire et les habiletés verbales et visuo-spatiales générales, des corrélations partielles de Bravais-Pearson entre les performances aux tests cognitifs et linguistiques et les performances aux épreuves de l'itinéraire ont été calculées en contrôlant l'effet du facteur l'âge et en appliquant la correction de Bonferroni (Tableau 2). Des liens entre les performances verbales de l'itinéraire et les habiletés verbales, d'une part, et entre les performances aux épreuves visuelles de l'itinéraire et les habiletés visuo-spatiales, d'autre part, étaient attendus. Par ailleurs, un lien entre les capacités d'attention et les connaissances verbales et visuo-spatiales était également attendu.

Tableau 2 : Corrélations partielles entre les connaissances de l'itinéraire et les habiletés verbales et visuo-spatiales générales (en contrôlant l'âge et après correction de Bonferroni, corrélations significatives à $p < 0,05$ indiqués en rouges)

		Description verbale				Cartographie				Reconnaissance visuelle					
		Repères			Orientations	Repères			Cibles	Distracteurs		Directions	Carte		
		Repères décisionnels	Repères confirmatoires	carrefours		Mentions de repères	Placement de repères	Carrefours		Orientations	Distracteurs similaires			Distracteurs différents	
Habiletés Visuo-spatiales et mnésiques	Attention (N=79)	Précision	0,17	-0,20	0,04	0,10	0,11	0,05	0,24	0,24	0,09	-0,15	-0,12	0,30	-0,06
		Vitesse	-0,20	-0,26	-0,17	-0,11	-0,29	-0,13	-0,37	-0,36	-0,09	0,23	0,03	-0,18	0,09
	Mémoire de travail (N=79)	Empan verbal endroit	0,12	-0,18	0,02	-0,04	-0,06	-0,08	0,06	0,10	0,10	0,09	0,00	0,22	0,02
		Empan verbal envers	-0,01	-0,20	0,02	0,04	-0,04	-0,06	-0,09	-0,10	0,07	-0,04	-0,06	0,05	0,12
		Empan spatial endroit	0,12	0,08	0,12	0,07	0,08	0,08	0,20	0,16	0,12	0,14	-0,09	0,07	-0,08
		Empan spatial envers	0,17	0,14	0,09	0,14	0,17	0,08	0,18	0,15	-0,21	-0,22	0,04	0,12	-0,08
		Binding	0,31	0,12	0,19	0,07	0,15	0,17	0,22	0,29	0,08	-0,09	0,09	0,30	0,02
	Perception of direction (N=79)		0,42	0,32	0,31	0,25	0,34	0,22	0,41	0,32	0,15	-0,21	-0,04	0,43	0,01
MRT (N=20)		0,20	-0,06	0,16	0,22	0,21	0,36	0,05	0,16	0,07	0,30	-0,09	0,34	0,32	
Habiletés verbales (N=59)	Compréhension de phrases		-0,11	0,01	0,04	-0,15	-0,01	0,08	0,20	0,14	-0,08	-0,07	-0,14	0,33	-0,15
	Maison	Production des prépositions spatiales	0,14	0,08	-0,02	0,01	-0,28	-0,16	-0,10	0,01	-0,02	-0,06	-0,10	-0,05	-0,18
		Compréhension des prépositions spatiales	0,14	0,08	-0,02	0,01	-0,11	0,04	-0,01	0,01	0,01	0,23	0,18	-0,11	0,06
		Production des verbes	0,12	0,03	-0,12	-0,06	-0,12	-0,05	-0,10	-0,10	-0,13	0,08	0,13	-0,08	-0,11
		Compréhension des verbes	0,01	0,15	0,09	-0,07	0,03	-0,01	0,16	0,07	-0,03	-0,00	0,20	0,10	-0,05
	ENNI	Première mentions	0,20	0,22	0,07	0,04	0,07	-0,00	0,05	0,00	-0,05	-0,24	-0,09	0,23	-0,28
Organisation de l'histoire		0,27	0,30	0,24	0,20	0,05	-0,03	0,19	0,15	0,08	-0,21	0,02	0,23	-0,09	

Les performances de perception des directions augmentent significativement avec le nombre de mentions des repères décisionnels ($r=0,42$), l'indication des carrefours sur la carte ($r=0,41$) et la reconnaissance des carrefours ($r=0,43$). A l'inverse, la vitesse des réponses dans l'épreuve d'attention est corrélée négativement avec l'indication de carrefours ($r=-0,37$) et d'orientations ($r=-0,36$) sur la carte.

8. Discussion-Conclusion

L'objectif de cette recherche était d'étudier les composantes cognitives et linguistiques impliquées dans la formation de représentations mentales d'itinéraires depuis l'enfance jusqu'à l'âge adulte. En particulier, nous avons examiné la connaissance des repères et de la route d'un itinéraire virtuel, chez des enfants de 5-6 ans (GSM), de 7-8 ans (CE), de 9-10 ans (CM) et des adultes. Ces connaissances ont été évaluées par des épreuves de production et de reconnaissance, et ce dans deux formats d'encodage, verbal et visuo-spatial. Deux questions de recherche ont été abordées : le rôle du format des tâches sur la restitution des connaissances concernant les repères et la route ; les différences inter-individuelles, notamment les liens entre les habiletés verbales ou visuo-spatiales et les formats des connaissances acquises.

Plusieurs hypothèses ont été testées. Premièrement, malgré l'existence de certaines connaissances relativement précoces concernant les connaissances des repères, supposées acquises plus tôt que les connaissances de la route, et à la lumière de la complexité de nos tâches, nous attendions une augmentation avec l'âge de la qualité et de la quantité de repères mentionnés et reconnus. En particulier, l'acquisition des connaissances de la route devait se refléter dans deux indices : une augmentation des indications et de la reconnaissance des directions ; ainsi que d'une augmentation des relations entre les repères et les directions, montrant une compréhension du rôle spécifique des repères décisionnels. Ainsi, alors que les plus jeunes enfants devraient focaliser leur attention sur les différents éléments, les enfants plus âgés devraient être capables de relier et organiser ces éléments entre eux créant ainsi une représentation globale.

Notre seconde question est l'étude des différences inter-individuelles. Notre hypothèse était que les différences inter-individuelles dans la représentation spatiale d'itinéraires devraient être liées avec des différences dans les habiletés cognitives et linguistiques, comme devraient l'attester les corrélations suivantes : 1) entre les capacités d'attention et l'ensemble des performances de représentation ; 2) entre les compétences visuo-spatiales de mémoire de travail, de perception des directions et de rotation mentale et les mesures non verbales de la représentation d'itinéraire ; et 3) entre les capacités de production et de compréhension du langage et les performances de description et de vérification d'affirmations concernant l'itinéraire ; notamment, la capacité d'organiser le discours devrait corrélérer avec celles permettant de lier et de structurer les informations entre elles. Cette hypothèse de liens spécifiques entre certaines habiletés cognitives et certaines capacités de représentation d'itinéraire soutiendrait l'existence de différentes représentations ou formats de représentation.

De la connaissance des repères à la connaissance « route » ?

Concernant les connaissances des repères, conformément à nos hypothèses, elles sont observées dès 6 ans, mais celles-ci progressent également avec l'âge. Dès six ans, les enfants sont capables de mentionner et de reconnaître quelques repères. La quantité des repères mentionnés dans la description verbale (qui passe de 1,5 à 14 repères avec l'âge), indiqués sur la carte (passant de 0,5 à 7,5 repères) et reconnus à l'aide d'images (de 4,7 parmi 7 à 6,5 parmi 7) augmente graduellement entre l'âge de 6 ans et l'âge adulte. Cette augmentation est observée aussi bien dans les épreuves verbales que dans les épreuves visuo-spatiales. Les connaissances mesurées par ces deux modalités semblent donc impliquer des informations communes. L'augmentation de l'attention portée aux repères pourrait correspondre à l'un des processus communs pouvant expliquer cette augmentation. En effet, des études précédentes ont mis en évidence que la capacité à focaliser l'attention sur certains éléments aide les enfants à mémoriser un itinéraire (Cornell et al., 1989 ; Heth et al., 1997). La capacité à focaliser son attention sur des repères peut également améliorer la qualité des termes mentionnés pour désigner ces entités ou plus précisément le type d'éléments sélectionnés puis utilisés comme repères. Toutefois, l'analyse de nos corrélations ne montre pas d'augmentation des connaissances spatiales avec une augmentation de l'attention. Dans cette étude, nous avons pu observer une augmentation de la qualité des repères mentionnés, marquée par une diminution de l'utilisation de termes génériques et une augmentation de termes plus spécifiques correspondant à de vrais repères.

A partir de 10 ans, ce sont les repères décisionnels (repères situés à un changement de direction) qui sont les plus souvent mentionnés. Comme dans l'étude de Cohen et Schuepfer (1980), utilisant un diaporama, ou celle de Jansen-Osmann et Wiedenbauer (2004), utilisant une navigation en labyrinthe virtuel avec ou sans repères, les repères décisionnels sont mentionnés plus souvent que les repères confirmatoires. Notons également que les repères décisionnels semblent être l'un des indicateurs les plus représentatifs d'une bonne représentation de l'itinéraire. En effet, le nombre de repères décisionnels est corrélé avec la majeure partie des autres performances dont notamment les performances de cartographie et de reconnaissances des directions correctes. Cette observation soutient les différentes études qui ont montré que les repères décisionnels font partie des éléments les plus importants pour réussir à reproduire un itinéraire avec un minimum d'informations (Michon & Denis, 2001 ; Denis, 2012). Le rôle stratégique des repères décisionnels est également étayé par leurs liens avec les mentions et la reconnaissance des directions, lien qui n'est pas observé pour les repères confirmatoires.

Toutefois, alors que cet effet du rôle des repères est observé dans tous les groupes d'âge (de 7 ans à l'âge adulte) dans les études précédentes, seuls les enfants de 10 ans et les adultes de notre étude mentionnent plus de repères décisionnels que de repères confirmatoires ; alors que les jeunes enfants (6 et 8 ans) mentionnent autant de repères des deux types. Tenir compte du rôle stratégique de la position des repères (en favorisant les repères décisionnels) semble être difficile et n'apparaît réellement que vers 10 ans dans notre étude. Par ailleurs, contrairement à l'étude de Jansen-Osmann et Wiedenbauer (2004) mais en cohérence avec celle de Cohen et Schuepfer (1980), les performances des enfants les plus âgés de notre étude sont moins bonnes que celles des adultes. La facilitation précédemment attribuée à la réalité virtuelle n'a donc pas été observée dans notre étude. Comme évoqué précédemment, une raison pouvant expliquer cette divergence dans les résultats pourrait être liée à la complexité relative des tâches utilisées (Jansen-Osmann et al., 2007). En effet, notre itinéraire est plus complexe que celui utilisé dans les études antérieures, comprenant notamment plus d'éléments distracteurs que celui de Jansen-Osmann et Wiedenbauer (2004). De plus, le type d'apprentissage diffère d'une étude à l'autre : apprentissage actif dans leur étude et passif dans la nôtre. Cette autre différence peut également expliquer la divergence dans les résultats, comme le soulignent de nombreuses études montrant des différences dans l'apprentissage d'un même environnement selon que le participant est actif ou passif (pour une revue, Chrastil & Warren, 2012).

Malgré cette divergence dans les résultats, nos deux études observent chez les enfants les plus âgés et chez les adultes un effet du rôle des repères selon leur emplacement. Cependant, il faut noter que dans ces deux études, l'emplacement des repères n'a pas été contrebalancé. Or la position des repères n'est pas le seul élément pouvant favoriser l'attention qui leur est portée et ainsi favoriser leur mémorisation. Dans notre étude, les repères montraient des degrés différents de saillance. Certains pourraient donc être mieux mémorisés que d'autres du fait de ces caractéristiques, qui sont indépendantes de l'itinéraire. Un meilleur contrôle de ces caractéristiques est donc nécessaire pour confirmer l'impact du rôle des repères au sein d'un itinéraire.

Par ailleurs, l'augmentation des mentions de repères dans les descriptions verbales est corrélée au nombre de repères cités et positionnés au cours de l'épreuve cartographique. De plus, la capacité à placer un repère sur une carte est liée à la capacité à se représenter un itinéraire (à l'aide d'une vision route) ou un environnement (à l'aide d'une vision survol). Cette augmentation de la capacité à placer les repères avait déjà été trouvée dans des études réalisées auprès d'enfants de 6 à 10 ans (ex. Herman, 1980 ; Sandamas & Formeman, 2007). Notons que dans notre étude, tous les participants ont rencontré plus de difficultés à citer des repères pendant

l'épreuve cartographique que pendant la description verbale, alors que l'épreuve cartographique succédait à la description verbale, ce qui aurait pu avoir un effet facilitateur. Ce résultat peut être dû à des difficultés d'utilisation d'une carte, mais Peter et al. (2010) ont montré que les enfants de 5-6 ans comprennent comment utiliser une représentation symbolique de ce type. Une autre explication est possible à la lumière du lien fort que nous avons observé entre les repères cités et placés sur la carte. Etant donné ce lien, ainsi le fait que les participants pouvaient citer les repères sans les placer sur la carte, il est possible qu'ils n'aient cité que ceux qu'ils pouvaient placer, ce qui expliquerait leur difficulté avec la tâche cartographique.

Connaître et indiquer une position nécessite de se souvenir de l'élément à positionner mais également des relations qu'il entretient avec d'autres éléments (par exemple, distance, direction). Bauer et al. (2012) ont étudié la mémorisation d'événements, d'emplacements et d'événements avec emplacement des enfants de 4 à 8 ans. Ils montrent que chacune de ces mesures progresse avec l'âge, mais que seuls les enfants de 8 ans sont capables de se souvenir des événements avec leur emplacement, suggérant que la capacité à lier une position à un événement est acquise tardivement. Ce développement tardif pourrait donc expliquer la difficulté qu'ont les enfants à lier un repère à une position et celle-ci devrait être également attestée au cours de la tâche de description verbale. A ce propos, notons que dans notre étude, nous avons demandé explicitement aux enfants de mentionner la position des repères dans l'épreuve de la carte, mais pas dans celle de la description verbale, ce qui ne nous permet pas de comparer directement l'indication des positions dans ces deux tâches. Enfin, rappelons que même les adultes voient leurs performances diminuer d'une tâche à l'autre (de presque 16 repères dans la description à uniquement 7-8 repères). Les différences de performances entre ces tâches de description à une carte (connaissance survol) pourraient donc refléter des difficultés à construire une représentation de l'environnement en survol.

La mémorisation des positions des repères est également liée à la connaissance de la route, attestée par différentes mesures : les mentions ou la reconnaissance des carrefours et des orientations ainsi que la connaissance des liens entre ces informations et des repères. Outre l'augmentation de la quantité et qualité des repères dans les descriptions verbales, nous avons observé une augmentation de la quantité et de la diversité des relations spatiales exprimées dans ces descriptions, ainsi qu'une augmentation des indications des directions. Une augmentation de la qualité du tracé de l'itinéraire sur la carte ainsi que de la reconnaissance des directions est également observée. Mais, alors que la majorité des directions est reconnue dès 8 ans (70 % de choix corrects), leur mention dans une description ou leur indication sur une carte est très difficile pour les enfants de 6 et de 8 ans. Par ailleurs, la capacité à reconnaître, mentionner et

tracer des directions est liée à la connaissance des repères, notamment à la capacité à mentionner les repères adjacents à un changement de direction (repères décisionnels). La capacité à tenir compte du rôle des repères dans la description verbale apparaît en même temps que la capacité à placer les repères sur une carte ; ce qui semble indiquer l'implication des processus complexes similaires. Ces deux capacités se développent avec la capacité à utiliser, indiquer et lier des informations multiples. Nous avons donc observé une distinction entre les connaissances des repères ou des directions selon le format utilisé lors de la restitution (production verbale ou sur carte) et selon le type de rappel (production ou reconnaissance).

Précisons qu'avec l'augmentation de la qualité des repères mentionnés (sélection des repères spécifiques, avec utilisation des prépositions spatiales) la capacité à reconnaître des repères augmente également, bien que celle-ci soit de plus en plus influencée par un biais de dénomination avec l'âge. En effet, alors que les repères sont de plus en plus reconnus et les distracteurs différents (i.e. dénomination et aspect visuel différents) sont de plus en plus correctement rejetés, les distracteurs similaires (i.e. dénomination identique mais aspect visuel différent) sont de plus en plus considérés comme des repères. Les adultes semblent donc se baser sur la dénomination des repères (ex. « fontaine ») et non sur leur aspect visuel dans la tâche de reconnaissance. Ce résultat conforte l'influence de la proximité sémantique précédemment observée par Hund et Plumert (2003). Toutefois, alors que ce biais sémantique diminue avec l'âge dans leur étude, il augmente dans la nôtre. Cette divergence indique qu'il s'agirait d'un biais sémantique différent dans les deux études. Dans l'étude de Hund et Plumert, sa diminution indiquerait une augmentation de l'acuité d'identification des entités d'une même catégorie sémantique et de leurs placements. Dans notre étude, son augmentation résulterait d'une sémantisation des repères en fonction d'un concept au détriment des indices visuels. Le biais que nous observons pourrait alors résulter d'une tendance à privilégier de plus en plus une représentation verbale de l'itinéraire avec l'âge. Toutefois, rappelons que l'expérimentateur a nommé les repères lors de leur présentation dans la tâche de reconnaissance visuelle de notre étude. Cet aspect de la procédure a pu inciter certains participants à s'appuyer sur la dénomination, et non sur l'image qu'ils observaient, afin de répondre. Cette hypothèse devrait être explorée dans des recherches futures.

En résumé, nous observons un développement progressif de la connaissance des repères dès 6 ans jusqu'à l'âge adulte. L'acquisition de la connaissance de la route semble débiter plus tardivement, notamment entre 8 et 10 ans, et se poursuivre jusqu'à l'âge adulte. Notre constat que

l'acquisition des connaissances concernant les repères précèdent celles qui concernent la route, sont cohérents avec l'hypothèse de Piaget et Inhelder (1948) et de Siegel et White (1975). Toutefois, la connaissance des repères étant fortement liée à celle des directions, qui contribue aux connaissances de type route, une influence mutuelle entre les repères et route est possible. En effet, les connaissances de type route semblent augmenter lors du développement des mentions de repères décisionnels. Or ces repères semblent être au cœur de la représentation de l'itinéraire. L'augmentation des mentions spécifiques de ces repères pourrait principalement s'expliquer par l'augmentation des capacités d'attention et/ou de mémorisation. L'acquisition plus tardive des connaissances de la route peut être due à la difficulté qu'ont les enfants à associer et à ordonner dans le temps des informations multiples. Par ailleurs, ce développement des connaissances de l'itinéraire est observé avec des mesures visuo-spatiales ainsi que verbales, et la connaissance d'un format semble influencer la connaissance d'un autre format. En effet, la présence d'un distracteur similaire influence la performance des participants dans la tâche de reconnaissance des repères. Ces observations peuvent indiquer l'existence d'une seule représentation de l'itinéraire, mais comportant des informations de formats distincts, ou l'existence de deux représentations distinctes, mais très fortement liées.

Notre second questionnement concerne le lien entre la qualité des représentations d'un itinéraire et les capacités cognitives et linguistiques des individus, afin d'expliquer les différences inter-individuelles observées. Dans notre étude, les participants devaient mémoriser un itinéraire complexe comprenant de nombreux changements de direction et de nombreux repères mais également de nombreuses informations non pertinentes (par exemple, arbres, mobilier urbain, personnages). Il ne serait donc pas surprenant que les capacités d'attention soient fortement mobilisées et puissent être liées à des différences de performance dans les mentions et de la reconnaissance des repères ou des directions. Toutefois, nous n'observons pas de corrélation significative entre les performances de précision attentionnelle et les performances dans les tâches liées à l'itinéraire. Seule la vitesse de traitement lors de l'épreuve d'attention est négativement corrélée avec les capacités à indiquer sur une carte l'itinéraire emprunté. La vitesse de traitement, plus que l'attention elle-même, pourrait donc être partiellement en jeu. Cette hypothèse mériterait d'être testée plus précisément dans des recherches futures. Les capacités d'attention ou plutôt de vitesse de traitement ne sont pas les seules mobilisées pour expliquer les différences individuelles. Selon nos résultats, la capacité à percevoir correctement les directions lors d'une épreuve à petite échelle est également impliquée dans la qualité de la représentation spatiale, contrairement à Quaiser-Phohl et al. (2004), qui ont utilisé des tests différents. Des études antérieures avaient trouvé des résultats similaires aux nôtres mais avec des épreuves de

perception des directions à grande échelle, c'est-à-dire à l'échelle d'une navigation réelle (ex. Neidhardt & Popp, 2010).

Contrairement à nos attentes et aux résultats de Fenner et al. (2000) ou de Purser et al. (2012), la mémoire de travail (ou plus précisément le buffer épisodique) ne semble pas être impliquée dans l'apprentissage d'itinéraires. Nos résultats n'étayaient donc pas le rôle de la mémoire de travail dans la construction et la mémorisation d'une représentation spatiale précédemment mise en évidence dans des études chez l'adulte (ex. Gras et al., 2013). L'absence d'effet ou le faible impact de l'attention ou de la mémoire peut également s'expliquer par le fait que l'itinéraire a été présenté à deux reprises, favorisant ainsi sa mémorisation. Toutefois, les performances aux épreuves sur l'itinéraire ne montrent pas ou peu d'effet plafond, ce qui rend cette explication peu probable ou insuffisante. Les capacités de rotation mentale (manipulation mentale) ne semblent pas non plus jouer un rôle crucial dans la capacité de représentation spatiale, contrairement à ce qui a été précédemment observé dans quelques études chez l'adulte (ex. Quaiser-Pohl et al., 2004).

Enfin, aucune des mesures langagières utilisées dans notre étude n'est liée aux mesures de navigation. Ce résultat peut être dû à la présence d'un effet plafond ou d'un manque de sensibilité des tests utilisés pour nos groupes d'âge. En effet, la majorité des enfants connaissaient déjà les prépositions spatiales et les verbes de mouvement testés. En conclusion, seules quelques habiletés cognitives visuo-spatiales étudiées seraient impliquées dans la production et la reconnaissance des repères et des directions, et aucune connaissance verbale mesurée ici ne semble être impliquée dans la construction d'une représentation spatiale. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Fenner et al. (2000) qui ont demandé à des enfants de réaliser une navigation dans un campus mais également de répondre à des tests d'habiletés verbales et visuo-spatiales. Ils ont observé que les mesures visuo-spatiales étaient bien liées avec les performances de navigation, mais pas les mesures verbales. Ceci indiquerait que les habiletés visuo-spatiales joueraient un rôle primordial alors que les habiletés verbales ne seraient que peu impliquées dans les différences de performances liées aux représentations spatiales d'itinéraires. Toutefois, les mesures utilisées étaient simples et n'exprimaient pas ou peu de variabilité individuelle. Des capacités plus complexes pourraient alors être mises en jeu dans l'acquisition de connaissances spatiales. D'autres recherches seraient nécessaires afin d'explorer directement cette hypothèse.

En conclusion, cette première étude s'intéresse aux composantes verbale et visuo-spatiale impliquées dans le développement de représentation d'itinéraires. Ce développement de représentation spatiale semble se faire par étapes. Dès 6 ans, certaines connaissances concernant les repères ont été observées, mais elles semblent encore limitées, nécessitant du temps et de nouvelles acquisitions pour devenir fonctionnelles. Ces premières connaissances des repères vont devenir de plus en plus précises et de plus en plus reliées à d'autres informations. Ainsi, on observe une évolution de la connaissance des repères à la connaissance de la route. La connaissance des directions, tout comme le développement d'une meilleure sélection des repères efficaces (ex. repères décisionnels), est tardive et permettra le développement d'une représentation efficace.

Nous avons observé un développement des connaissances verbales et visuo-spatiales de la représentation d'un itinéraire virtuel. Ce développement semble se faire en parallèle, impliquant donc soit une unique représentation de l'itinéraire soit deux représentations distinctes mais dépendantes l'une de l'autre. Toutefois, cette représentation semble s'appuyer de plus en plus sur un format verbal comme le montre l'augmentation du biais de dénomination. Il semblerait donc qu'il y ait deux types ou formats de représentations, mais que le développement de chacune de ces représentations nécessite une base commune.

Enfin, seules les habiletés visuo-spatiales semblent influencer les différences inter-individuelles fréquemment observées dans la capacité à se représenter un environnement. Vu certaines limites de notre étude, notamment l'effet plafond observé avec les tests d'habiletés verbales, ces influences devraient être étudiées de façon plus approfondie avant de pouvoir conclure que le langage ne joue aucun rôle dans ces différences inter-individuelles.

Chapitre 5 :

Expérience 2_ Représentation spatiale : diversification des environnements et des tâches verbales et visuo-spatiales

1. Introduction

Dans notre première expérience sur l'étude des composantes cognitives et linguistiques dans la représentation d'itinéraires chez l'enfant et chez l'adulte, nous avons observé des connaissances des repères et des directions dès l'âge de 6 ans. Toutefois, ces compétences ne sont pas suffisantes pour permettre une navigation performante ou une transmission d'informations efficace et elles continuent à se développer tout au long de l'enfance. Ainsi, les descriptions verbales contiennent de plus en plus d'informations concernant les repères, les directions et leurs relations, devenant de plus en plus précises et efficaces pour une navigation ultérieure. Nos résultats sont comparables à ceux de Jansen-Osmann et Wiedenbauer (2004) ou de Cohen et Schuepfer (1980) en ce qu'ils montrent : un rappel préférentiel des repères décisionnels par opposition aux repères confirmatoires. Toutefois, cet effet du rôle des repères n'est pas observé chez les jeunes enfants (6 et 8 ans) de notre étude alors qu'il est attesté pour tous les groupes d'âge, y compris à 6-8 ans, dans les deux autres études. De plus, alors que dans l'étude de Jansen-Osmann et Wiedenbauer (2004), les enfants les plus âgés (10-11 ans) et les adultes ont des performances comparables, l'étude de Cohen et Schuepfer (1980) et la nôtre observent une évolution des performances. Ces différences peuvent principalement être expliquées par deux différences dans le matériel utilisé et la procédure. Premièrement, la complexité des itinéraires n'est pas la même ; notre itinéraire comprend de nombreuses informations distractrices et très peu de régularité de configuration, contrairement aux itinéraires des deux autres études. Deuxièmement, le mode de présentation diffère, avec une présentation par une séquence de diapositives dans l'expérience de Cohen et Schuepfer (1980), une navigation active en réalité virtuelle dans l'expérience de Jansen-Osmann et Wiedenbauer (2004) et une navigation passive en réalité virtuelle dans notre expérience. De plus, la position des repères utilisés dans notre expérience n'a pas été contrebalancée, aussi il est possible que des informations non liées au statut du repère mais à sa saillance perceptive ont joué un rôle dans la facilité relative de mémorisation des différents repères.

Dans cette première étude, nous avons également montré qu'avec l'âge le développement des connaissances spatiales est observé lorsqu'elles sont testées par des tâches aussi bien verbales que visuo-spatiales, en production et en reconnaissance. Cependant, l'influence de la dénomination sur la reconnaissance visuelle des repères suggère l'utilisation d'un codage verbal de ces repères. L'augmentation du biais observé avec l'âge indiquerait que les individus s'appuient de plus en plus sur ce type de codage et donc sur une forme de représentation verbale de l'itinéraire. Il faut cependant rappeler que dans notre étude, les repères étaient nommés par l'expérimentateur, ce qui peut avoir été à l'origine de ces résultats et doit être contrôlé.

Enfin, une forte variabilité individuelle a été observée, et les performances aux tâches évaluant les connaissances spatiales ont pu être mises en relation principalement avec les capacités d'attention et de perception des directions, mais pas avec les compétences verbales. Cette distinction entre l'importance des capacités visuo-spatiales d'une part et l'absence de relation avec les capacités verbales d'autre part avait aussi été observée dans l'étude de Fenner et al. (2000). Purser et al. (2012) par contre, avaient constaté une augmentation des capacités de mémorisation d'un itinéraire virtuel en lien avec une augmentation des habiletés non-verbales mais également des habiletés verbales. Ils expliquent ce résultat principalement par le développement des fonctions exécutives, dont le rôle est donc à prendre en compte dans l'analyse des différents types de représentations verbale et visuo-spatiale d'un itinéraire virtuel.

2. Problématique

Une deuxième expérience a été conduite afin de vérifier la validité de certains résultats importants de l'expérience 1 en multipliant les itinéraires et en considérant des interprétations alternatives. Cette expérience vise également à tester l'équivalence de différents itinéraires virtuels et à vérifier la sensibilité de nouvelles mesures verbales et visuo-spatiales des itinéraires, nécessaires à la réalisation de la troisième étude.

Tout d'abord, nous souhaitons tester l'hypothèse relative à l'existence de deux formats (verbal et visuel) de représentation d'itinéraire, de leur évolution en parallèle et de leur interdépendance. Nous émettons en effet l'hypothèse que les deux formats de représentation d'une même information (ex. d'un repère) peuvent coexister. Les adultes utiliseraient aisément ces deux formats de représentation, mais s'appuieraient préférentiellement sur un encodage verbal de l'information. Au contraire, les enfants utiliseraient initialement uniquement ou

principalement un codage visuel. Ces deux formats de représentation seraient par ailleurs interdépendants. En effet, ils concernent une même information qui sera codée et recodée selon les informations perçues et traitées. Afin de tester cette hypothèse, nous manipulerons le format du matériel de restitution (verbal vs non-verbal) et contrôlerons l'influence du codage verbal sur la reconnaissance de repères visuels. L'influence de ce codage, observée dans l'expérience 1 avait pu être induite par le test lui-même, du fait de la dénomination des repères et de l'effet de l'ordre des tâches (tâche cartographique toujours consécutive à une description verbale). Afin de réaliser un meilleur contrôle de ces possibles biais expérimentaux, la dénomination des repères accompagnant les images est supprimée dans cette nouvelle expérience et les tâches destinées à évaluer les représentations des itinéraires sont présentées dans un ordre contrebalancé.

Deuxièmement, nous souhaitons vérifier l'importance du rôle de la position des repères (décisionnels versus confirmatoires), observés lors de la première expérience ainsi que dans les études de Cohen et Schuepfer (1980) et de Jansen-Osmann et Wiedenbauer (2004). Un contrebalancement de l'emplacement de chaque repère devrait permettre d'éviter les biais liés aux propriétés intrinsèques des repères choisis (ex. saillance) et ainsi s'assurer de l'importance du rôle du statut décisionnel vs confirmatoire des repères.

Troisièmement, dans la première étude, nous avons observé une augmentation de la quantité et de la qualité des informations mémorisées. Il n'est pas exclu que cette augmentation soit due au développement des capacités de la mémoire épisodique, sans qu'il y ait un caractère spécifique de l'organisation des connaissances spatiales. Une difficulté d'inhibition des informations non pertinentes pourrait également expliquer ces résultats. Aussi, ces capacités seront mesurées à l'aide d'épreuves indépendantes dans cette nouvelle expérience pour tester ces hypothèses alternatives.

3. Méthode

3.1. Participants

Au total, 78 nouveaux participants ont été recrutés. Les participants sont des enfants de 5 à 11 ans (N=48) et des jeunes adultes de 18 à 30 ans (N=32), de langue maternelle française. Comme dans l'expérience 1, les enfants sont tous scolarisés dans les classes de grande section de maternelle, de cours élémentaire ou de cours préparatoire de deux écoles primaires en milieu rural. Ils ont été recrutés au sein de leur école, par le biais de courriers adressés à leurs parents,

avec l'accord des directeurs, des enseignants et du comité de parents d'élèves. Les adultes constituent notre population de référence. Ce sont principalement des étudiants de psychologie de l'université Paris Descartes. Les étudiants pouvaient être rétribués sous la forme de points pour un enseignement. Les mêmes critères d'inclusion que ceux de l'expérience 1 ont été adoptés. Dix adultes recrutés n'ont pas été inclus dans les analyses (un non-francophone, 8 bilingues précoces, un bilingue tardif et un cas où un problème technique s'est produit).

Soixante-huit participants sont donc inclus dans les analyses : 12 enfants de grande section de maternelle (5,6 ans \pm 4,5 mois ; 9 filles ; 11 droitiers), 18 enfants de cours élémentaire (7,7 ans \pm 3,3 mois ; 10 filles ; 16 droitiers), 18 enfants de cours moyen (9,7 ans \pm 3,5 mois ; 10 filles ; 16 droitiers) et 22 adultes (20,2 ans \pm 16,8 mois : 11 femmes ; vingt droitiers). Seulement 12 enfants de grande section de maternelle ont été recrutés du fait de leur difficulté à maintenir leur attention sur la session « itinéraire ». Les ratios concernant le sexe (environ autant de femmes et d'hommes) et la latéralité manuelle (dominance du nombre de droitiers) sont semblables dans tous les groupes.

3.2. Matériel

Le matériel est composé d'une part du questionnaire préalable, de l'itinéraire d'entraînement, des tests complémentaires (à l'exception de l'ENNI) de l'expérience 1 ; et d'autre part de trois nouveaux itinéraires, d'épreuves de restitution et de tests cognitifs supplémentaires.

a) Itinéraires virtuels

Une nouvelle histoire a été créée pour introduire l'expérience et mettre les enfants en situation d'étudier les itinéraires pour réaliser les différentes tâches (Annexe 1 « l'agent 201 »).

L'itinéraire d'entraînement est le même que celui de l'expérience 1. Trois nouveaux itinéraires (« I », « II » et « III ») ont été créés avec le logiciel « Virtools 5.0, Dassault system ». Ils comportent chacun onze croisements dont cinq correspondent à des changements de direction. Ils sont composés d'éléments urbains multiples parmi lesquels dix constituent des repères : cinq repères décisionnels (i.e. : situés à un changement de direction), et cinq repères confirmatoires (i.e. : situés à un lieu où il ne faut pas changer de direction). Pour chacun des trois itinéraires tests, deux versions ont été créées pour contrebalancer l'emplacement de ces repères. Ainsi, dans

une version un repère donné est décisionnel et dans l'autre version, ce même repère est confirmatoire. Les différentes villes comportent des repères présentant des équivalences structurelles et physiques (ex. différents types de magasins, de grands mobiliers urbains) dont 6 repères à indice verbal écrit (ex. le mot « mairie » inscrit sur le fronton du bâtiment) et 4 sans indice verbal (ex. une tour bleue). Chaque itinéraire dure 2 minutes et 15 secondes.

b) Tâches de restitution du trajet

- **Reconnaissance visuelle des repères**

L'entraînement à l'épreuve de reconnaissance visuelle des repères est composé des items de l'expérience 1. Pour la reconnaissance visuelle des repères des itinéraires tests, 25 images différentes par ville ont été créées : 10 repères, leurs 10 équivalents similaires et cinq distracteurs différents (Annexe 5 tableau F).

La similarité des items similaires a été pré-testée sur 10 adultes (Annexe 5). Un item est considéré comme distracteur similaire lorsque sur une échelle de 1 à 7 (1 pour différent; 7 pour similaire), les participants considéraient l'aspect sémantique similaire mais l'aspect visuel différent. Les items considérés comme trop similaires visuellement (score supérieur à 4) étaient modifiés afin d'augmenter les différences visuelles. Neuf images ont été ainsi modifiées. La dénomination de chaque item était demandée. Aucune paire d'items n'a été considérée comme trop distincte du point de vue de leur dénomination (score inférieur à 5), leur choix n'a donc pas été modifié.

- **Reconnaissance auditive/verbale des repères**

Quatre mots désignant des repères de la ville d'entraînement ont été enregistrés. Deux désignent des repères cibles de l'itinéraire, deux des éléments distracteurs non présentés dans l'itinéraire. Pour les villes I et III, 18 mots ont été enregistrés (neuf repères et neuf distracteurs) et 20 mots pour la ville II (10 repères et 10 distracteurs). Les mots étaient présentés dans un ordre aléatoire, à l'aide du logiciel E-Prime-2. Certains des mots distracteurs correspondent à des distracteurs visuels (10 distracteurs sur 28 au total). La fréquence d'utilisation des mots des différentes villes peut être considérée comme équivalente (Annexe 5 tableau H).

- **Choix de direction**

L'entraînement à l'épreuve de choix de directions est identique à celui de l'expérience 1. Les phases tests comprennent 11 photographies de carrefours pour chaque itinéraire et chacune de leur version. Sur chaque image, des flèches indiquent les directions possibles (tout droit, à gauche et/ou à droite).

c) Épreuves complémentaires

Afin de mesurer les habiletés cognitives et linguistiques, les épreuves complémentaires standardisées d'attention, de mémoire de travail, de compréhension de phrases et de production et compréhension de prépositions spatiales et verbes de mouvement de l'expérience 1 sont proposées. S'y ajoutent une épreuve de flexibilité-inhibition (test de « Stroop animaux » de Pennequin, Nanty & Khomsi, 2004) et une épreuve de mémoire épisodique (test de « scène de famille », Wechsler, 2001). Le matériel et la procédure de ces tests sont détaillés en Annexe 3.

3.3. Procédure

Le recueil des données est réalisé par deux expérimentateurs. L'entretien des adultes est réalisé en une seule session d'une heure quarante-cinq environ, dans une salle calme de l'institut de psychologie de l'université Paris Descartes. L'entretien des enfants est réalisé dans leur école, au cours de deux ou trois sessions selon leur niveau de fatigue (une session pour l'itinéraire d'environ 45 minutes et une ou deux sessions de 30 à 45 minutes pour les épreuves complémentaires). La participation des volontaires est effectuée après une présentation de l'étude et après réception par écrit d'un consentement libre et éclairé des adultes et d'un ou de plusieurs représentant(s) légal(aux) des enfants.

3.3.1. Itinéraires virtuels

La procédure pour chaque présentation d'itinéraire est identique à celle de l'expérience 1, avec une étape d'encodage de l'itinéraire (présentation de l'itinéraire deux fois) suivie d'une étape de restitution du trajet, illustrée Figure 25. L'ordre et la version de présentation des villes sont contrebalancés parmi les participants d'un groupe d'âge (6 ordres, en Annexe 5 tableau C).



Figure 25 : Exemple d'ordre de présentation des épreuves des itinéraires (Ordre 2)

Entre chaque nouvel itinéraire, une épreuve complémentaire est insérée, servant de tâche interférente pour limiter les risques de confusion entre itinéraires. Celle-ci correspond à l'une des tâches mesurant les habiletés générales des sujets : tâche d'attention après l'entraînement, de perception des directions (« Flèches ») après le premier itinéraire, de flexibilité-inhibition (« Stroop ») après le deuxième, voir Figure 26).



Figure 26 : Alternance entre les épreuves virtuelles et les tests complémentaires

3.3.2. Tâches de restitution du trajet

La restitution du trajet comporte une épreuve de description verbale (identique à celle de l'expérience 1), une reconnaissance verbale des repères (présentation orale de leur dénomination), une épreuve de reconnaissance visuelle des repères et une épreuve de choix de direction. Les épreuves mesurant la représentation spatiale de l'itinéraire sont présentées dans un ordre contrebalancé (exemple d'ordre de présentation Figure 25). Il y a 6 ordres différents dont trois commençant par la production verbale (description) et trois commençant pas la reconnaissance visuelle des repères (contrebalancement en Annexe 5 tableau D). La description verbale se trouve toujours avant l'épreuve de reconnaissance verbale des repères et l'épreuve de reconnaissance visuelle des repères se situe toujours avant l'épreuve de reconnaissance des directions.

A) Reconnaissance visuelle des repères

La procédure reprend celle de l'expérience 1. Par ville, chaque participant(e) voit 15 images présentées dans un ordre aléatoire: 6 images cibles, 4 images similaires et 5 images différentes. Un contrebalancement parmi les participants des images présentées en cible ou distracteur similaire est réalisé (5 versions, Annexe 5 tableau E).

B) Reconnaissance auditive/verbale des repères

Les participants doivent appuyer sur la touche verte (« A ») du clavier de l'ordinateur si le mot entendu correspond à un élément vu au cours de l'itinéraire et sur la touche rouge (« P ») s'il ne l'a pas vu. Les mots sont répétés jusqu'à l'obtention de la réponse et en cas de difficulté à distinguer le mot enregistré.

C) Choix de direction

La procédure est identique à celle de l'expérience précédente ; à l'aide du logiciel E-Prime, les photographies sont présentées du point de vue d'un piéton, dans leur ordre d'apparition au cours du parcours.

3.3.3. Tests complémentaires

En plus des tâches d'attention, de perception des directions et de flexibilité-inhibition présentées après chaque itinéraire, les autres épreuves complémentaires sont présentées après le troisième itinéraire, dans un ordre similaire à celui de l'expérience 1, l'épreuve de mémoire épisodique concluant la passation des enfants (Annexe 3).

4. Hypothèses opérationnelles

Cette deuxième étude reprend les hypothèses de la première expérience à l'aide de plusieurs villes et d'un meilleur contrôle du matériel.

Les hypothèses de cette étude sont donc centrées sur quatre axes principaux :

(1) Le développement : Une augmentation progressive des performances devrait être observée dans la reconnaissance des repères et des directions.

(2) Le codage verbal :

La reconnaissance verbale des repères devrait être plus difficile pour les enfants les plus jeunes que la reconnaissance visuelle du fait des difficultés d'accès au vocabulaire.

Lors de la reconnaissance des repères :

Si l'effet de similarité (biais de dénomination) observé lors de l'expérience 1 est un biais méthodologique, les items similaires de cette étude devraient être correctement rejetés.

À l'inverse, si le biais de dénomination n'était pas un artefact, il devrait être retrouvé dans cette étude. Il devrait être observé principalement chez les adultes, supposant qu'ils s'appuient principalement sur un codage verbal. Les rejets corrects des distracteurs similaires devraient donc diminuer avec l'âge.

(3) Les liens entre les représentations d'itinéraires et les habiletés non-verbales : Les capacités d'attention et de perception des directions devraient être liées aux capacités de représentation, notamment de mémorisation des repères décisionnels. Les capacités de mémoire épisodique devraient être liées avec la quantité d'informations mémorisées. La capacité d'inhibition devrait être liée à la capacité de sélectionner les informations pertinentes et donc à la mémorisation des repères décisionnels.

(4) L'équivalence des villes virtuelles : Aucune différence de performance n'est attendue entre les différentes villes construites et aucun effet d'ordre des tâches n'est attendu, permettant de vérifier que les performances observées ne sont pas liées aux stimuli ou aux influences entre les tâches.

5. Résultats

Les analyses statistiques conduites sont identiques à celles de l'expérience 1. Toutefois, l'effet de la ville (3 conditions : ville I, ville II, Ville III) et de l'ordre de présentation des villes (3 conditions : 1^{ère} ville, 2^{ème} ville, 3^{ème} ville) est testé par une analyse multivariée à mesures répétées intra-groupe. Cette analyse multivariée permet également de comparer les effets inter-groupes (Âge, 4 modalités) et intra-groupes des variables dépendantes appariées.

Des analyses de corrélations de Spearman avec correction de Bonferroni sont également réalisées entre les performances de reconnaissance de l'itinéraire et les capacités cognitives mesurées à l'aide des épreuves complémentaires.

L'analyse des descriptions verbales fera l'objet d'un travail ultérieur et ne sera donc pas incluse dans les résultats présentés dans cette thèse.

5.1. Reconnaissance visuelle des repères :

- Reconnaissance des items cibles et rejet des items distracteurs similaires et différents

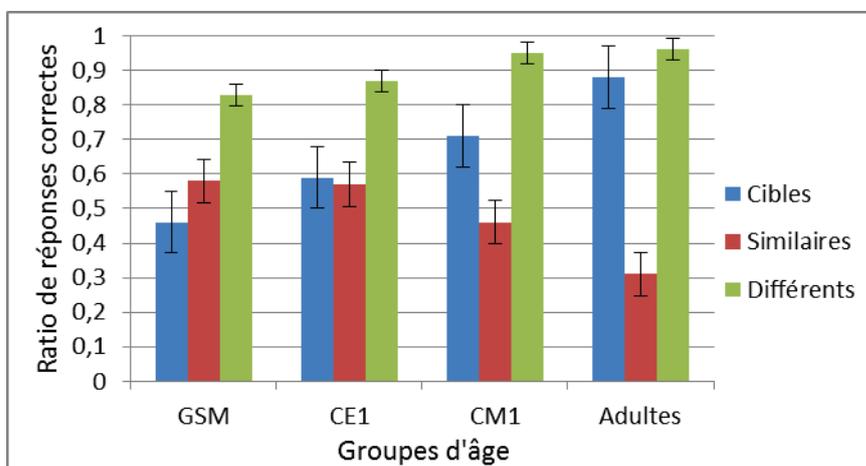


Figure 27 : Ratio de reconnaissances et rejets corrects des items par classe d'âge

L'analyse de variance à mesures répétées des taux de réponses correctes des images de repère selon leur type (Figure 27) met en évidence un effet du groupe d'âge ($F(3,66)=3,89$; $p<0,05$; $\eta^2=0,15$), du type de repères ($F(2,132)=118,03$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,64$) et une interaction groupe*type de repères ($F(6,106)=8,70$; $p<0,001$; $\eta^2=0,42$). Les analyses post-hoc permettent de préciser que le taux de reconnaissance des repères (cibles) augmente progressivement

(différences intergroupes d'âges consécutifs ; $p < 0,05$). Cette augmentation s'accompagne toutefois d'une diminution des réponses correctes aux items similaires sémantiquement, c'est-à-dire qu'il y a une augmentation progressive des fausses reconnaissances des items similaires entre les CE1 et CM1 ($p < 0,05$) et CM1 et adultes ($p < 0,01$). Nous répliquons donc les résultats obtenus dans l'expérience 1. Par ailleurs, le rejet des distracteurs différents est important (supérieur à 80%) dès le groupe des GSM, ce qui suggère un effet plafond pour ces images.

- Reconnaissance visuelle des repères suivant leur rôle : Décisionnel versus Confirmatoire

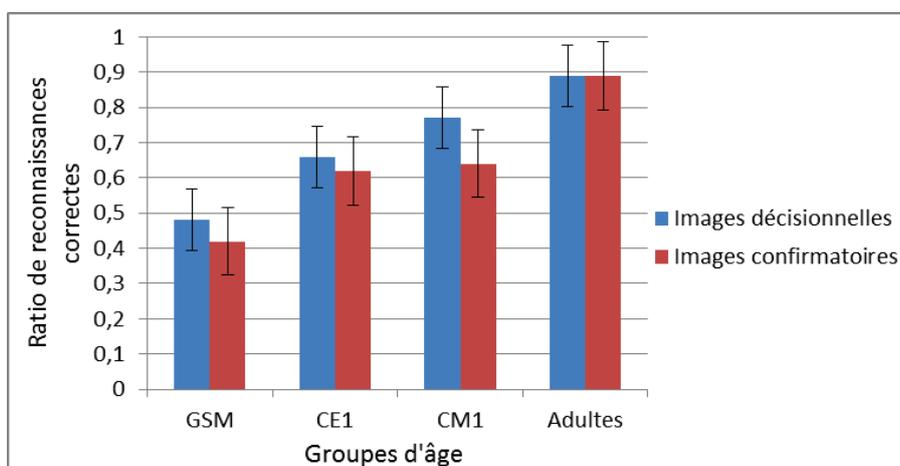


Figure 28 : Ratio de reconnaissances des items décisionnels et confirmatoires par classe d'âge

L'analyse de variance à mesures répétées des taux de reconnaissances correctes des repères (Figure 28) confirme l'effet de l'âge ($F(3,66)=29,26$; $p < 0,0001$) ; $\eta^2=0,57$), avec une progression jusqu'à l'âge adulte pour lequel nous observons un effet plafond. L'effet de l'emplacement des repères est significatif ($F(1,66)= 5,64$; $p < 0,05$; $\eta^2=0,08$), les repères décisionnels étant mieux reconnus que les repères confirmatoires. Il n'y a pas d'interaction entre l'âge et la position des repères.

- Performance de reconnaissance visuelle des repères par ville

L'analyse de variance à mesures répétées du taux de réponses correctes aux items visuels révèle un effet de l'âge ($F(3,66)=9,43$; $p < 0,0001$; $\eta^2=0,30$) mais pas d'effet de la ville ($F(2,132)=1,37$; $p=0,25$) et pas d'interaction niveau scolaire * ville ($F(6,132)=1,25$; $p=0,28$).

Les trois villes ne sont donc pas différentes du point de vue de la difficulté de la reconnaissance visuelle des repères.

- Performance de reconnaissance visuelle des repères par ordre de présentation des villes

L'analyse de variance à mesures répétées du taux de réponses correctes aux items visuels révèle un effet de l'âge ($F(3,66)=9,43$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,30$) mais pas d'effet d'ordre de présentation des villes ($F(2,132)=2,59$; $p=0,08$; $\eta^2=0,04$) et pas d'interaction entre ces deux facteurs ($F(6,132)=0,64$; $p=0,69$).

5.2. Reconnaissance verbale/auditive des repères

Le test de reconnaissance des affirmations étant trop difficile au cours de l'expérience 1, un test de reconnaissance auditive des repères a été proposé.

- Reconnaissance verbale des repères selon leur rôle: décisionnel versus confirmatoire

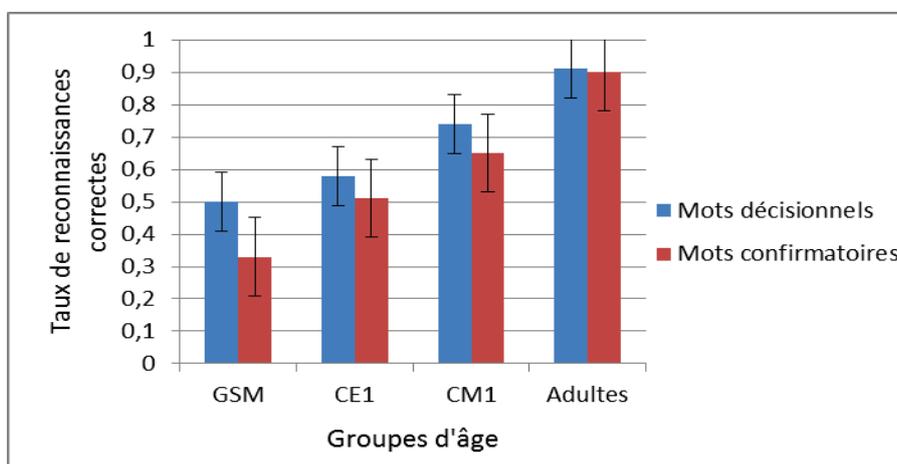


Figure 29 : Ratio de reconnaissances des mots désignant les repères décisionnels et confirmatoires par classe d'âge

L'analyse de variance à mesures répétées des taux de reconnaissances correctes des repères (Figure 29) montre un effet de l'âge ($F(3,66)=37,43$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,63$), de l'emplacement des repères ($F(1,66)= 21,44$; $p<0,001$; $\eta^2=0,24$) et une interaction entre ces deux

facteurs ($F(3,6)=3,28$; $p<0,05$; $\eta^2=0,13$). L'analyse post-hoc précise que l'effet de l'emplacement des repères (Décisionnels>Confirmatoires) diminue avec l'âge, la différence étant significative uniquement chez les enfants (GSM à $p<0,01$; CE1 à $p<0,05$ et CM1 à $p<0,05$). L'interaction observée s'explique par un effet plafond chez les adultes.

- Performance de reconnaissance auditive par ville

L'analyse de variance à mesures répétées du taux de réponses correctes aux items audio révèle un effet de l'âge ($F(3,66)=74,00$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,77$) mais pas d'effet de la ville ($F(2,132)=0,90$; $p=0,41$) et pas d'interaction entre ces deux facteurs ($F(6,132)=1,79$; $p=0,11$).

- Performance de reconnaissance auditive par ordre de présentation des villes

L'analyse de variance à mesures répétées du taux de réponses correctes aux items audio révèle un effet de l'âge ($F(3,66)=71,79$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,77$) mais pas d'effet de l'ordre des villes ($F(2,132)=1,12$; $p=0,33$) et pas d'interaction entre les deux ($F(6,132)=0,71$; $p=0,64$).

5.3. Test de décision

L'analyse de variance du ratio de prise de décision de directions correctes met en évidence un effet de l'âge ($F(3,66)=35,03$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,61$). L'analyse post-hoc précise qu'il y a une différence significative entre chaque groupe concomitant (GSM : $x=0,54$; $SE=0,36$ vs. CE1 : $x=0,64$; $SE=0,45$ vs. CM1 : $x=0,75$; $SE=0,55$ vs. Adultes $x=0,89$; $SE=0,61$; $p<0,05$). Nous obtenons donc le même profil de résultats que lors de l'expérience 1.

- Performance de reconnaissance des directions par ville

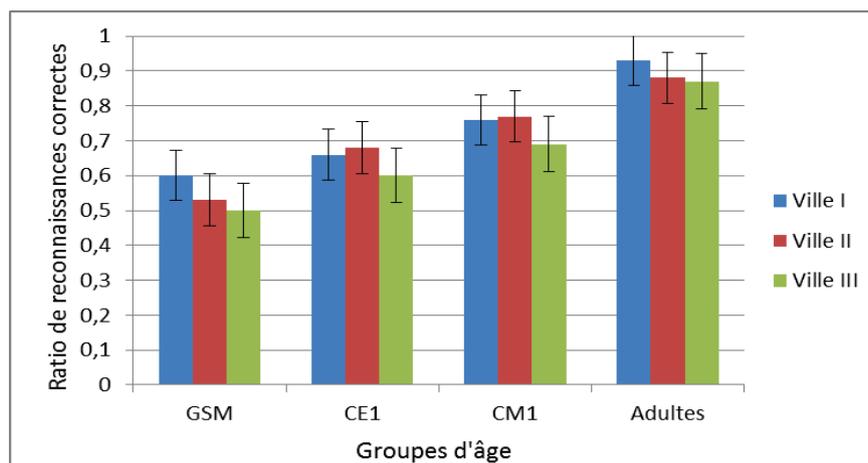


Figure 30 : Ratio de prise de décision de directions correctes par classe d'âge et par ville

L'analyse de variance à mesures répétées du taux de reconnaissance des directions (Figure 30) présente un effet de l'âge ($F(3,65)=34,78$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,62$) et un effet des villes ($F(2,130)=7,16$; $p<0,01$; $\eta^2=0,09$) mais pas d'effet d'interaction entre les deux ($F(6,130)=0,52$; $p=0,79$). Les analyses post-hoc montrent que le test de reconnaissance des directions de la ville III est moins bien réussi que celui de la ville II pour les CE1 ($p<0,05$) et de la ville I pour les CM1 ($p<0,05$). Ces différences peuvent s'expliquer par la présence d'un croisement dans une rue plus étroite que les autres rues de cette ville, conduisant chez certains enfants à plus d'hésitations et d'erreurs.

- Performance de reconnaissance des directions par ordre de présentation

L'analyse de variance à mesures répétées du taux de reconnaissance correcte des directions montre un effet de l'âge ($F(3,65)=34,78$; $p<0,001$; $\eta^2=0,62$) mais pas d'effet de l'ordre ($F(2,130)=0,40$; $p=0,67$) et pas d'interaction entre les deux ($F(6,130)=0,61$; $p=0,72$). Le fait de voir une ville donnée en 1^{ère}, 2^{ème} ou 3^{ème} position n'influence pas les performances.

5.4. Lien entre la représentation d'itinéraires et les habiletés cognitives

Afin d'évaluer la variabilité interindividuelle et ainsi de déterminer les liens entre les connaissances de représentation d'itinéraires et les habiletés cognitives, des corrélations partielles de Bravais-Pearson ont été calculées en contrôlant l'effet de l'âge et la correction de Bonferroni.

Les performances de précision attentionnelle augmentent significativement avec le nombre de directions correctement reconnues ($r=0,42$). À l'inverse, la vitesse de réalisation de cette tâche est corrélée négativement avec le nombre de repères confirmatoires reconnus visuellement ($r=-0,38$) et des repères décisionnels reconnus oralement ($r=-0,38$). Les performances de perception des directions augmentent avec le nombre de repères reconnus oralement ($r=0,47$) et avec le nombre de directions reconnues ($r=0,52$). Les performances d'empan spatial envers augmentent avec le score de reconnaissance des repères nommés ($r=0,49$) et avec celui des directions reconnues ($r=0,42$). Les autres performances de mémoire de travail ne sont pas corrélées aux performances dans les tâches basées sur les itinéraires. De plus, l'augmentation des performances de mémoire épisodique est liée au score de reconnaissance des repères reconnus sous forme de mots ($r=0,42$) et des directions ($r=0,49$). Enfin, les performances d'inhibition et de flexibilité, de rotation mentale ou de compétences langagières ne sont pas significativement corrélées aux performances dans les tâches basées sur les itinéraires.

6. Discussion – Conclusion

Dans cette deuxième expérience, nous avons cherché à confirmer et préciser certains des résultats obtenus dans la première expérience concernant les composantes cognitives et linguistiques impliquées dans la formation de représentations mentales d'itinéraires par des enfants et des adultes. En particulier, nous avons voulu approfondir les effets de rôle des repères et de biais de dénomination observés dans la première étude. De plus, les capacités de représentation d'itinéraires sont marquées par de nombreuses différences interindividuelles chez l'adulte (ex. Wen, Ishikawa & Sato, 2014) comme chez l'enfant (ex. Hemmer et al., 2013). Une interprétation est que cette variabilité s'explique par des différences de capacité mnésique ou exécutive, comme le suggèrent Purser et al. (2012). Un autre objectif était de tester cette hypothèse. Un troisième objectif était de généraliser ces résultats lors de la présentation de plusieurs itinéraires et d'évaluer l'équivalence entre ces itinéraires virtuels destinés à la réalisation de la troisième expérience.

Reprenant le même type de dispositif et de procédure que pour l'expérience 1, mais en la complétant, nous avons considéré la reconnaissance à la fois verbale et visuelle des repères en manipulant systématiquement leur position dans les itinéraires présentés. Les performances de représentation spatiale ont été mises en lien avec les différentes capacités cognitives et langagières considérées dans l'expérience 1 mais aussi en considérant les capacités de mémoire épisodique, et de fonction exécutive (de flexibilité et d'inhibition).

De nombreuses études ont permis d'observer un développement des capacités de représentation d'itinéraires virtuel au cours de l'enfance mesurant le plus souvent des connaissances non-verbales de l'itinéraire (ex. Farran et al., 2012 ; Jansen-Osmann & Fuchs, 2006). Dans la première expérience, un tel développement a été observé pour la connaissance des repères mais également pour celle de type route, à la fois en considérant les performances à des épreuves verbales et visuo-spatiales. Il a été observé qu'une augmentation de la capacité de sélection des informations pertinentes accompagne le développement de ces connaissances. Par exemple, la mémorisation des repères situés à un changement de direction augmente avec la connaissance de la route, contrairement aux autres repères. Le rôle décisionnel de ces repères a été observé chez l'enfant (ex. Cohen & Schuepfer, 1980 ; Jansen-Osmann & Wiendenbauer, 2004 ; Farran et al., 2012) et chez l'adulte (ex. Miller & Carlson, 2011). Nous avons confirmé cet effet de supériorité des repères décisionnels dans notre première étude. Toutefois, la saillance et la position des repères n'avaient pas été strictement contrôlées. Les résultats obtenus dans l'expérience 2 nous permettent de conforter l'idée que cet effet est bien lié à leur rôle, que les tâches utilisées pour attester de la représentation construite soient verbales ou non-verbales. En effet, du fait du contrebalancement des positions, il est possible d'affirmer que les images de repères décisionnels sont toujours mieux reconnues que celles correspondant à des repères confirmatoires, et ce notamment chez les enfants les plus jeunes. Les performances de reconnaissance des repères présentés sous forme de mots est proche de celui des repères présentés visuellement (légèrement inférieures chez les enfants). La reconnaissance des repères confirmatoires est faible chez les GSM (seulement un tiers des repères sont reconnus) et à l'inverse, un effet plafond est observé chez les adultes. De plus, des résultats semblables sont obtenus avec la reconnaissance verbale des repères. L'épreuve semble donc être trop facile pour eux ce qui leur permet de se souvenir de tous les éléments qu'ils soient stratégiquement importants ou non. Enfin, le rôle de la position des repères est observé à la fois dans des tests de reconnaissance verbale et visuo-spatiale. Nous avons également observé que la capacité à reconnaître des repères décisionnels, qu'ils soient présentés visuellement ou oralement, est liée à

la capacité à reconnaître des directions. L'importance du rôle décisionnel des repères pour connaître la route (Michon & Denis, 2002) est donc encore une fois démontrée.

Par ailleurs, au cours de l'épreuve de reconnaissance visuelle des repères de l'expérience 1, un biais de dénomination avait été observé. Cette observation pouvait être expliquée par le fait que les repères sont codés spontanément par les enfants comme par les adultes à la fois verbalement et visuellement (forme de double codage, Paivio, 1971) ou par un biais expérimental dû au fait que la présentation des images des repères était accompagnée par leur dénomination orale. La deuxième expérience permet de répondre à cette objection méthodologique. Un même biais lié à la dénomination est observé, conduisant à la fausse reconnaissance des distracteurs similaires, et ce même en l'absence d'une dénomination orale. Ainsi, nous observons une augmentation de la capacité de reconnaissance des repères et de rejets corrects des distracteurs différents mais également une augmentation du nombre de fausses reconnaissances des images distractrices similaires, et ce malgré l'absence de dénomination verbale et malgré le fait que la reconnaissance visuelle soit réalisée aléatoirement avant ou après la description verbale. Le biais de dénomination observé lors de la première étude n'était donc pas dû à la dénomination des images lors de la tâche, ni à l'ordre de présentation des tâches. Les adultes auraient donc bien tendance à mémoriser les repères sous un format au moins partiellement verbal et ils utiliseraient un double codage de l'information en s'appuyant davantage sur leur codage verbal par comparaison avec les enfants. A l'inverse, les jeunes enfants utiliseraient principalement un codage visuel puis seraient capables vers 8 ans de double codage, comme l'a également proposé Pickering, (2001).

Les études antérieures ont rapporté des différences individuelles chez l'enfant (Quaiser-Pohl et al., 2004 ; Hemmer, et al., 2013) et chez l'adulte (Fields & Shelton, 2006). Dans notre deuxième expérience, nous avons étudié les relations pouvant exister entre les capacités de représentation spatiales d'itinéraires et diverses capacités cognitives plus générales. Les résultats appuient les études antérieures montrant le rôle important des capacités d'attention et de perception des directions sur la capacité à reconnaître des repères nommés et à choisir les directions correctes (ex. Fenner et al., 2000 ; Neidhart & Popp, 2010). Contrairement à notre première étude, la capacité à reconnaître les repères et les directions augmente avec les capacités de mémoire de travail (plus précisément avec sa composante visuo-spatiale). Ce résultat est également cohérent avec les observations d'autres auteurs (Fenner et al., 2000 ; Purser et al., 2012). Contrairement à notre première étude, la position des repères ne semble pas être spécifiquement liée aux habiletés cognitives considérées. Il faut néanmoins remarquer que cet effet avait été obtenu dans l'analyse des mentions des repères, et donc de leur production ; or ici,

seules des épreuves de reconnaissance des repères ont été analysées, ce qui implique des niveaux de traitement différents. La mention de repères décisionnels implique la génération d'information et une sélection volontaire, alors que la reconnaissance peut ne se baser que sur un simple sentiment de familiarité. Cette capacité de sélection impliquerait alors des capacités cognitives spécifiques.

Par ailleurs, les capacités d'attention, de perception et de mémorisation à court terme ne suffisent pas à expliquer les différences interindividuelles. L'augmentation de la quantité d'informations spatiales incluses dans la représentation d'itinéraires peut également s'expliquer par une augmentation de la capacité mnésique. Nous observons en effet un lien entre les performances de reconnaissance des repères et des directions avec les capacités de mémoire épisodique. Toutefois, l'augmentation des capacités cognitives et notamment de mémorisation à court terme et à long terme est souvent expliquée par un défaut exécutif (ex. Gathercole, 1999 ; Pickering, 2001 ; Cowan, 2012), que nous avons donc évalué. Ici cependant, les capacités de flexibilité et d'inhibition ne semblent pas jouer de rôle décisif pour réaliser les tâches de reconnaissances que nous avons proposées, contrairement à l'hypothèse de Purser et al. (2012).

Nous avons également pour objectif de nous assurer de l'équivalence de plusieurs villes différentes. Nous n'avons pas observé de différences significatives dans le traitement des repères de ces villes, et ce que les repères soient présentés visuellement ou oralement. Les trois villes peuvent donc être considérées comme équivalentes du point de vue de leurs repères. Du point de vue des changements de direction, un itinéraire semble être légèrement plus difficile que les autres itinéraires du fait d'un carrefour moins souvent reconnu par certains enfants. Malgré cette légère différence, les trois villes seront conservées et seul leur ordre de présentation doit être contrôlé pour éviter un biais éventuel.

En conclusion, on observe dès six ans un effet de la position des repères, et donc de leur rôle pour la prise de décision en relation avec les directions dans différentes tâches verbales et non-verbales. Par ailleurs, une modification du format ou du codage de la représentation de l'itinéraire semble s'opérer avec l'âge. Alors que les jeunes enfants semblent s'appuyer sur un codage principalement visuel, les adultes semblent réaliser un double codage tout en utilisant plus facilement le codage verbal. Cette question nécessite toutefois d'être plus amplement explorée. Une possibilité serait de limiter l'accès et donc l'utilisation de l'un des deux formats, et d'en observer l'évolution avec l'âge. Cette possibilité sera explorée dans le chapitre suivant.

Chapitre 6 :

Expérience 3 _Rôle des composantes verbales et visuo-spatiales de la mémoire de travail

1. Introduction

Les deux expériences précédentes nous ont permis de montrer un développement progressif des diverses connaissances spatiales, liées aux repères et aux directions, avec une augmentation qualitative et quantitative des capacités à restituer des informations multiples. Cette augmentation a été observée au travers d'épreuves verbales comme visuo-spatiales ce qui suggère des possibilités de codage multiple des informations spatiales. Toutefois, alors que les jeunes enfants utiliseraient principalement un format de représentation visuel, les adultes réaliseraient un double codage, verbal et visuel (Pickering, 2001). Selon Garnham et Oakhill (1993), la construction et la manipulation des modèles mentaux s'effectuent en mémoire de travail. Considérant le modèle de Baddeley décrit dans le chapitre 3 (Section 1), des informations verbales comme «tourner à droite» devraient impliquer la boucle phonologique et le traitement d'informations visuo-spatiales, comme un plan impliquerait le calepin visuo-spatial.

Chez l'adulte, un certain nombre d'études se sont intéressées au rôle de la mémoire de travail au cours de la mémorisation d'itinéraires présentés à l'aide d'une multitude de supports comprenant aussi bien la navigation réelle ou virtuelle que des présentations vidéo, des descriptions verbales ou encore des présentations cartographiques. La plupart de ces études se sont appuyées sur le paradigme de double tâche pour mettre en évidence le rôle des composantes de la mémoire de travail dans la construction d'une représentation spatiale.

Des études en navigation réelle (ex. Garden et al., 2002) ou virtuelle (Meilinger et al., 2008) ont montré une diminution de la capacité de mémorisation d'itinéraire en présence d'une tâche concurrente verbale et spatiale. Garden et al. (2002) précisent que lors d'une présentation de l'itinéraire par une suite d'images, les performances sont principalement altérées par la tâche concurrente spatiale et non par la tâche verbale. Ainsi, la mémoire de travail spatiale jouerait un rôle général dans la représentation d'un itinéraire alors que la mémoire de travail verbale serait

plutôt liée au recodage d'une représentation spatiale, lui permettant ainsi, par une sorte de double codage, d'être mieux mémorisée.

L'effet d'interférence d'une tâche verbale et d'une tâche spatiale sur la formation d'une représentation mentale d'un itinéraire virtuel est également observé dans l'étude de Piccuci et al. (2013). Les deux formats de présentation d'un même itinéraire - description verbale ou réalité virtuelle - ont été comparés à la fois dans une condition contrôle et dans une condition de double tâche verbale (suppression articulatoire) ou spatiale («tapping»). Suite à une phase de mémorisation de l'itinéraire, les participants devaient vérifier des inférences (nécessitant la compréhension des relations entre les éléments de l'environnement) ou des informations explicites (indiquées lors de la mémorisation) et dessiner une carte de l'environnement. Conformément aux études de Garden et al. (2002) et de Meilinger et al. (2008), les auteurs observent un effet d'interférence variable suivant le support d'apprentissage et les tâches mesurant la qualité de la représentation spatiale formée. La composante spatiale serait fortement impliquée lors d'une mémorisation et d'une restitution visuelle (i.e. réalité virtuelle et carte), c'est-à-dire lorsque le support d'entrée et de sortie de l'information est identique ou congruent, confirmant l'idée selon laquelle les formats d'entrée et de restitution peuvent déterminer l'implication relative des différentes composantes de la mémoire de travail. Gras et collaborateurs (2013) observent un effet d'interférence différent selon le type de connaissance spatiale évaluée. Alors que les performances de localisation des repères sur une carte sont affectées par la réalisation des doubles tâches verbale et visuo-spatiale, le tracé de l'itinéraire (i.e. la vision survol) est quant à lui affecté uniquement lorsqu'une double tâche spatiale a été effectuée pendant l'apprentissage. En revanche, les performances de reconnaissance visuelle des repères ne diminuent pas dans les conditions de tâches concurrentes. Les effets d'interférence diffèrent donc suivant le format et le type d'information mesurés et donc impliqués dans l'épreuve.

Les travaux sur l'implication de la mémoire de travail dans la construction de représentations spatiales ont été enrichis par l'étude des différences interindividuelles en terme de capacités et de stratégies visuo-spatiales. En effet, dans l'étude de Gras et al. (2013) les individus possédant un empan spatial élevé subissent une interférence spatiale lors de la localisation de repères alors que ceux possédant un empan spatial moins élevé ne voient pas leurs performances diminuées par la tâche de «tapping». De même, dans l'étude de Baldwin et Reagan (2009), les performances de mémoire d'itinéraires virtuels des personnes ayant un bon sens de

l'orientation (mesuré par un auto-questionnaire) diminuent principalement en présence d'une tâche concurrente spatiale. Au contraire, les performances des individus possédant un faible sens de l'orientation sont principalement diminuées par la tâche interférente verbale. Une interprétation de ces résultats est que les personnes ayant un bon sens de l'orientation s'appuieraient principalement sur la composante spatiale de la mémoire de travail au cours de la mémorisation d'un itinéraire, alors que les personnes dont le sens de l'orientation est plus faible utiliseraient préférentiellement la composante verbale.

L'étude de Wen et al. (2011) conduit à nuancer ces observations. Ils proposent une mémorisation d'itinéraires à partir de vidéos avec double tâche verbale (décision lexicale), visuelle (visualiser mentalement des horaires) ou spatiale (indiquer la provenance de sons). Dans cette étude, les personnes ayant un bon sens de l'orientation subissent un effet d'interférence verbale et spatiale mais pas visuelle, pour les épreuves de reconnaissance de scènes et de choix de directions. Des effets d'interférence verbale, visuelle et spatiale sont observés dans une épreuve de cartographie de l'itinéraire. Quant aux participants dont le sens de l'orientation est faible, ils subissent les mêmes effets d'interférence verbale et spatiale pour l'épreuve de reconnaissance de scènes. En revanche, leurs performances de choix de directions diminuent avec les trois tâches concurrentes (verbale, visuelle et spatiale). Enfin, leurs performances de cartographie ne sont pas diminuées lors des doubles tâches, les performances étant initialement faibles. L'ensemble des participants utiliseraient donc les composantes verbales et spatiales pour mémoriser les repères et les routes. Un faible sens de l'orientation amènerait les individus à utiliser en plus la composante visuelle de la mémoire de travail pour mémoriser les segments de route. En revanche, un bon sens de l'orientation les amènerait à utiliser les trois composantes de la mémoire de travail pour coder l'information lors d'une représentation cartographique (survol). Ces résultats sont donc cohérents avec ceux de Baldwin et Reagan (2009) mais permettent d'observer que les différences d'implication de la mémoire de travail sont également dépendantes du support de restitution utilisé et des capacités visuo-spatiales de chaque individu.

En résumé, chez le sujet adulte, la mémoire de travail serait impliquée dans le processus de création d'une représentation spatiale. Les composantes verbales et visuo-spatiales de la mémoire de travail semblent tenir un rôle différent selon les informations présentées (ex. description verbale, vidéo) et évaluées (ex. tâche de reconnaissance des repères, cartographie) mais également selon les individus (leurs habiletés et stratégies). Chez l'enfant, seules quelques études se sont intéressées au lien entre les capacités de mémoire de travail et les capacités de

navigation (ex. Fenner et al., 2000 ; Purser et al., 2012). Ces études chez l'enfant ont permis de mettre en évidence un lien entre la capacité de la mémoire de travail et les capacités de mémorisation d'itinéraires. Ces deux études s'accordent sur le rôle de la mémoire de travail visuo-spatiale dans les capacités de représentation d'itinéraires mais divergent sur le rôle de la composante verbale et sur l'origine de ces observations. De plus, aucune étude à notre connaissance n'a actuellement montré l'implication directe de la mémoire de travail au cours de la construction d'une représentation spatiale d'itinéraire chez l'enfant au travers d'un paradigme de double tâche.

2. Problématique

Cette nouvelle expérience s'intéresse à l'implication des composantes verbales et visuo-spatiales de la mémoire de travail dans les représentations spatiales d'itinéraires au cours du développement. Dans nos deux premières expériences, nous avons pu observer des capacités de représentation précoces à l'aide de productions aussi bien verbales que graphiques et au travers de tâches de reconnaissance d'éléments aussi bien verbaux que visuels. Les enfants, comme les adultes, sont donc capables d'utiliser une représentation comportant des informations multiples. Cependant, nous avons observé que le poids relatif du codage verbal ou visuo-spatial des informations semblait évoluer avec l'âge. L'étude de l'implication de la mémoire de travail verbale et visuo-spatiale peut constituer un moyen d'approfondir cette question de codage et de son développement.

Comme nous l'avons vu plus haut, les études réalisées chez l'adulte ont montré que l'implication des composantes verbales et visuo-spatiales de la mémoire de travail pouvait être mise en évidence dans la construction d'une représentation spatiale au travers d'un paradigme de double tâche. Leurs résultats suggèrent que les effets d'interférence, et donc le rôle des composantes mobilisées, varient suivant le format du matériel à mémoriser, celui des tâches à réaliser, et également selon le type de connaissance spatiale évaluée. Dans cette expérience, nous étudierons au moyen de doubles tâches verbales et visuo-spatiales classiques le rôle spécifique des composantes spatiales et verbales lors de l'encodage, sur la mémorisation des informations verbales et visuelles, concernant les repères et la route d'itinéraires virtuels urbains. Les capacités de représentation évoluant avec l'âge, nous étudierons l'évolution du rôle de chacune des composantes sur la création d'une représentation. En raison de la difficulté de réalisation de

ces doubles tâches pour les enfants de GSM (5-6 ans), nous restreignons nos groupes d'âge aux enfants de CE1 (7-8 ans) et CM1 (9-10 ans) ainsi que des adultes.

Comme nous l'avons déjà observé, les capacités de représentation spatiale sont très variables selon les individus, à l'intérieur d'un même groupe d'âge. Nous nous intéresserons de nouveau dans cette expérience à ces différences interindividuelles, notamment au travers du lien entre les habiletés verbales et visuo-spatiales avec les effets d'interférence des doubles tâches. En effet, certaines études chez l'adulte ont mis en évidence des différences de représentation et des effets d'interférence des doubles tâches différentes selon les capacités ou stratégies individuelles (Gyselinck et al., 2009 ; Baldwin & Reagan, 2009 ; Wen et al., 2011). Bien que des études chez l'enfant aient mis en évidence des liens entre des capacités visuo-spatiales ou verbales et des capacités de navigation (ex. Fenner et al., 2000), aucune n'a encore mis en lien ces différences individuelles avec le rôle potentiel des composantes verbales et spatiales de la mémoire de travail. Nous allons donc étudier ces liens, pouvant expliquer certaines différences individuelles par le type de représentation initialement créé par l'individu ainsi que la flexibilité de cette représentation.

3. Méthode

3.1. Participants

Au total, 68 participants ont été recrutés. Les participants sont des enfants de 7 à 11 ans (N=37) et des jeunes adultes de 18 à 30 ans (N=31), de langue maternelle française. Les enfants sont tous scolarisés dans les classes de cours élémentaire (CE1) ou cours moyen (CM1) d'une école en milieu rural. Ils sont recrutés au sein de leur école, par le biais de courriers auprès de leurs parents, avec l'accord des directeurs, des enseignants et du comité de parents d'élève. Les adultes sont principalement des étudiants de psychologie de l'université Paris Descartes, pouvant être rétribués sous la forme de points pour un enseignement. Un CE1 (bilingue) et trois adultes (un bilingue, un problème technique et une interruption) ont été exclus.

Au final, 64 participants sont donc inclus à l'étude : 18 enfants de CE1 (7,8 ans \pm 2,8 mois; 10 filles ; 17 droitiers), 18 enfants de CM1 (9,8 ans \pm 3,6 mois; 11 filles; 14 droitiers) et 28 adultes (22,5 \pm 6,1, 4 mois ; 14 femmes; 27 droitiers). Le sexe ratio et la latéralité manuelle ne diffèrent pas entre les groupes. Dans chaque groupe, il y a une dominance du nombre de droitiers.

3.2. Matériel et procédure

Le matériel et le déroulement de l'expérience 3 est identique à ceux de l'expérience 2 excepté l'introduction de double-tâches lors de la mémorisation d'itinéraires tests.

Les trois itinéraires tests de l'expérience 2 sont présentés à chaque participant selon trois conditions:

- a) Le premier itinéraire test est présenté seul et sert de condition de base (**situation contrôle**).
- b) Les deuxièmes et troisièmes itinéraires tests sont présentés avec un paradigme de **double tâche**, c'est à dire que leur encodage est accompagné soit d'une tâche de **tapping** soit d'une tâche de **répétition verbale**.

La tâche de tapping consiste à appuyer sur les touches en bleu (touches «1-8-3» d'un pavé numérique), au rythme d'un appui de touche par seconde. Les appuis de touches sont enregistrés sous Eprime 2.0.

La tâche de répétition verbale consiste à répéter «ba-bo-bi» au rythme d'une syllabe par seconde. La répétition des syllabes est enregistrée à l'aide d'un dictaphone.

Un entraînement à chacune des tâches concurrentes est réalisé, jusqu'à ce que les participants arrivent à la réaliser sans grande difficulté, avant de l'associer à la mémorisation.

Chaque participant réalise donc les trois conditions : contrôle, tapping et «babobi».

L'ordre de présentation des itinéraires est aléatoire mais l'ordre de présentation des tâches concurrente est contrebalancé entre les participants (2 groupes; «tapping» puis «babobi» ou l'inverse). Suite à l'encodage d'un itinéraire, les participants réalisent les mêmes épreuves de représentation spatiale que dans l'expérience 2, selon le même ordre contrebalancé (2 groupes). Il y a donc quatre groupes (Annexe 5, tableau F).

4. Traitements des données

L'analyse des données est identique à celle de l'expérience 2 pour les épreuves de reconnaissance avec la variable double-tâche (3 conditions) manipulée intra-sujets.

Dans les descriptions verbales, nous analysons (a) les premières mentions des repères et (b) la structure de la description.

(a) L'analyse de la production des repères est centrée sur les premières mentions d'un item spécifique. Nous reprend la distinction utilisée lors de l'expérience 1 entre les termes *génériques*, correspondant à des éléments non spécifiques (ex. des arbres) et les *repères*, correspondant à un élément identifiable même hors contexte (ex. la mairie); et ajoute les *vecteurs* correspondant à des éléments structurels de la ville sur lequel le sujet navigue, ils sont définis selon l'environnement (ex. première rue à droite, passage piéton, place). La liste des termes génériques, vecteurs et des repères est constitué en fonction de l'ensemble des productions (Annexe 6 tableau J). Pour chaque terme, des codes permettent d'indiquer le type de mention (première mention ou mention ultérieure), le déterminant utilisé, l'utilisation d'une expression spatiale (ex. «devant») ou temporelle (ex. «après») et le terme utilisé.

La structure de la description est constituée de trois points:

- le **cadre** correspondant à l'indication d'emplacement d'un événement souvent par un repère (ex. «à la boulangerie») ou vecteur (ex. une place)
- l'**événement** correspondant à une action ou des états (ex. «il faut continuer»; «il y a»)
- la **direction** correspondant à l'indication spatiale d'évènement ou de cadre (ex. «tout droit»)

Pour chaque itinéraire, il y a un événement et un cadre initial et final et 14 événements intermédiaires (accompagné de leur cadre et de leur direction) intermédiaires. Chaque cadre, événement et orientation est coté 0 si il n'est pas mentionné et 1 si il l'est. Un score «cadre» (maximum 16 points), un score «événement» (maximum 16 points) et un score «direction» (maximum de 14 points) ont été calculés.

5. Hypothèses opérationnelles

Cette troisième étude permet d'approfondir les hypothèses des premières et deuxièmes expériences concernant le rôle du langage et des capacités visuo-spatiales dans la formation de représentations spatiales complexes. Ce rôle est testé à l'aide d'un paradigme de double tâche au cours de l'encodage.

Nous faisons l'hypothèse d'une implication du codage visuo-spatial au cours de la mémorisation d'itinéraire. Cette implication devrait se traduire par un effet d'interférence du tapping sur les performances à l'ensemble des tâches. La composante verbale devrait être impliquée uniquement dans les situations impliquant un double codage. Aussi, on s'attend à observer des effets d'interférence de la double tâche verbale sur les performances des épreuves verbales (description et reconnaissance).

Cependant, nous nous attendons à ce que ces effets d'interférence varient selon le développement. Premièrement, nous émettons l'hypothèse que l'effet de double tâche sera plus important chez les enfants que chez les adultes.

De plus, nous faisons l'hypothèse que les enfants privilégient ou s'appuient principalement sur un codage visuo-spatial des informations, et qu'ils seront de ce fait particulièrement sensibles à la double tâche de tapping. Les adultes à l'inverse réaliseraient un double codage de l'information spatiale, ce qui les rendraient moins sensibles à l'interférence spatiale.

6. Analyses statistiques

Les analyses statistiques sont identiques aux expériences 1 et 2, complétées par l'effet de condition d'encodage (contrôle, «tapping», «babobi»). Une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées suivie de tests post-hoc de Fisher, permettront l'analyse des effets du facteur inter-sujet «Âge» (CE1, CM1 et adultes), le facteur intra-sujet «Condition d'encodage» (contrôle, répétition verbale et tapping) ainsi que l'effet intra-sujet spécifique du test réalisé (ex. rôle du repère). La comparaison des performances dans la condition contrôle à celles observées dans l'une et l'autre tâche interférente nous permettra d'évaluer la présence d'un effet de double tâche, c'est-à-dire l'interférence de la seconde tâche sur les performances à l'épreuve principale. Des analyses de corrélations de Pearson, avec correction de Bonferroni, ont été réalisées entre les effets d'interférence et les habiletés cognitives.

7. Résultats

7.1. Performances aux épreuves de représentation d'itinéraires

Une première analyse concernant les descriptions verbales a été réalisée afin d'évaluer la loquacité des participants. Elle a été estimée par le nombre de mots produits au cours de la description. L'ANOVA à mesures répétées avec le facteur inter-sujet Âge(3) et le facteur intra-sujet Condition (3) permet de mettre en évidence un effet de l'âge ($F(2,61)=18,05$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,37$) et un effet de la condition ($F(2,122)=5,36$; $p<0,01$; $\eta^2=0,08$) mais pas d'interaction significative entre ces deux facteurs ($F(4,122)=1,72$; NS ; $\eta^2=0,05$). Les enfants de CE1 ($x=94,69$; $SE=11,57$) produisent significativement moins de mots que les enfants de CM1 ($x=130,64$; $SE=11,58$; $p<0,05$) qui en produisent moins que les adultes ($x=181,87$; $SE=9,28$; $p<0,01$). En condition contrôle ($x=148,91$; $SE=7,48$), les participants produisent significativement plus de mots qu'en condition tapping ($x=124,81$; $SE=7,48$; $p<0,01$) alors que la condition de répétition verbale ($x=133,48$; $SE=7,85$) ne diffère pas significativement des deux autres.

7.1.1. Connaissance des repères

A) Description des itinéraires : Analyse de la mention de repères

○ Analyse des termes utilisés : Repères, vecteurs et génériques

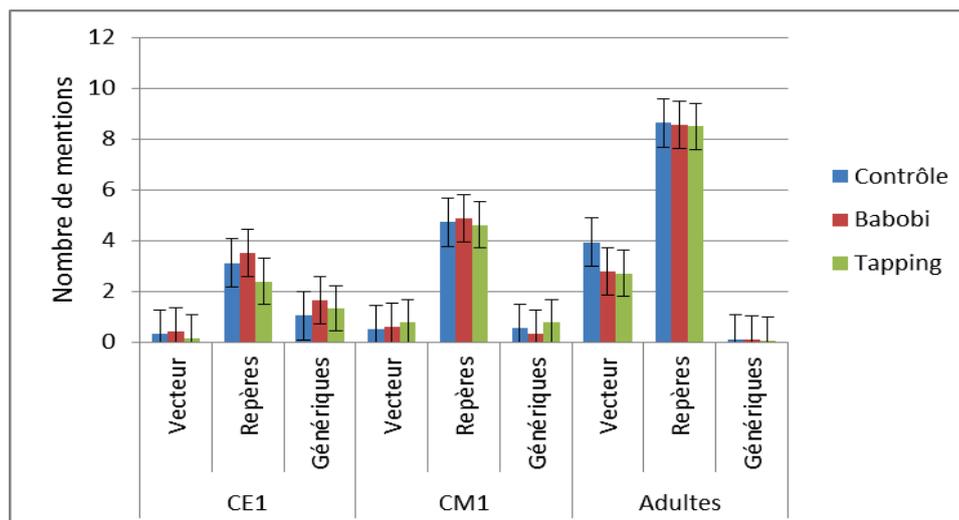


Figure 31 : Nombre moyen de termes génériques, de termes vecteurs et de repères mentionnés au cours de la description, par groupe d'âge et type d'encodage

L'ANOVA à mesures répétées pour les facteurs Encodage (3) et Terme (3) X Age (3), présentée Figure 31, met en évidence une différence significative entre les groupes d'âges ($F(2,61)=74,49$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,71$) et entre les termes mentionnés ($F(2,122)=286,30$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,82$) ainsi qu'un effet d'interaction entre le groupe d'âge et les termes mentionnés ($F(4,122)=48,88$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,62$). Les enfants mentionnent moins de termes que les adultes (CE1 : $x=1,56$; $SE=0,17$; CM1 : $x=1,98$; $SE=0,17$ vs. adultes : $x=3,93$; $SE=0,13$; $p<0,001$). Les termes **génériques** sont moins mentionnés que les **vecteurs** qui sont moins souvent mentionnés que les **repères** (génériques : $x=0,67$; $SE=0,10$ vs. vecteurs : $x=1,36$; $SE=0,17$; $p<0,001$; vs. repères : $x=5,43$; $SE=0,18$; $p<0,001$). Le nombre de repères augmente progressivement entre le CE1 et l'âge adulte ($p<0,0001$), le nombre de vecteurs augmente significativement uniquement entre le CM1 et l'âge adulte ($p<0,0001$) et le nombre de génériques diminue entre le CE1 et le CM1 ($p<0,05$).

Concernant les doubles tâches, il n'y a pas d'effet significatif de la condition d'encodage ($F(2,122)=1,21$; $p>0,05$) mais l'interaction entre l'âge et les conditions d'encodage est significative ($F(4,122)=2,52$; $p<0,05$; $\eta^2=0,08$). Cette interaction entre les conditions d'encodage et l'âge est due à l'absence de différence significative entre les conditions de double tâche chez les CM1 (contrôle : $x=1,93$; $SE=0,23$; babobi : $x=1,95$; $SE=0,20$ et tapping : $x=2,06$; $SE=0,21$) mais d'un effet de double tâche chez les adultes (contrôle : $x=4,23$; $SE=0,18$ vs. babobi : $x=3,81$; $SE=0,16$ et tapping : $x=3,71$; $SE=0,17$; $p<0,05$). Chez les CE1, une différence significative ($p<0,05$) est également observée entre la répétition verbale ($x=1,87$; $SE=0,21$) et le tapping ($x=1,29$; $SE=0,22$) mais pas avec la condition contrôle ($x=1,50$; $SE=0,23$). Il n'y a pas d'interaction significative entre les termes utilisés et la condition d'encodage ($F(4,244)=1,58$; $p>0,05$) ni entre les trois facteurs principaux Age X Terme X Encodage ($F(8,244)=1,19$; $p>0,05$).

○ Déterminants introduisant les repères

Afin d'évaluer la qualité des introductions des repères, une analyse a examiné les déterminants nominaux utilisés lors de chaque première mention de ces entités dans le discours. L'ANOVA à mesures répétées sur les déterminants utilisés (déterminants indéfinis et numériques vs. déterminants définis et possessifs) met en évidence des effets significatifs du type de déterminants ($F(1,61)=74,40$; $p<0,001$; $\eta^2=0,54$), de l'âge ($F(2,61)=74,09$; $p<0,001$;

$\eta^2=0,71$) et de l'interaction entre type de déterminants et âge ($F(2,61)=4,45$; $p<0,05$; $\eta^2=0,13$). Les CE1 et les CM1 mentionnent significativement moins de déterminants que les adultes (CE1 : $x=2,36$; $SE=0,25$ et CM1 : $x=2,89$; $SE=0,25$ vs. Adultes : $x=5,86$, $SE=0,20$; $p<0,001$). Les déterminants indéfinis sont plus souvent mentionnés que les déterminants définis (indéfini : $x=5,16$; $SE=0,25$ vs. Définis : $x=2,24$; $SE=0,17$; $p<0,001$) dans tous les groupes d'âges.

Par ailleurs, un effet de double tâche est également observé ($F(2,122)=16,10$; $p<0,001$; $\eta^2=0,20$). La production de déterminants est plus importante en condition contrôle ($x=4,28$; $SE=0,18$) qu'en condition de répétition verbale ($x=3,61$; $SE=0,17$; $p<0,001$) qui est elle-même plus importante que celle observée dans la condition de tapping ($x=3,22$; $SE=0,18$; $p<0,05$). Aucune interaction entre le type d'encodage et l'âge ou le type de déterminant n'est observé.

○ Utilisation de marqueurs spatio-temporels avec les repères

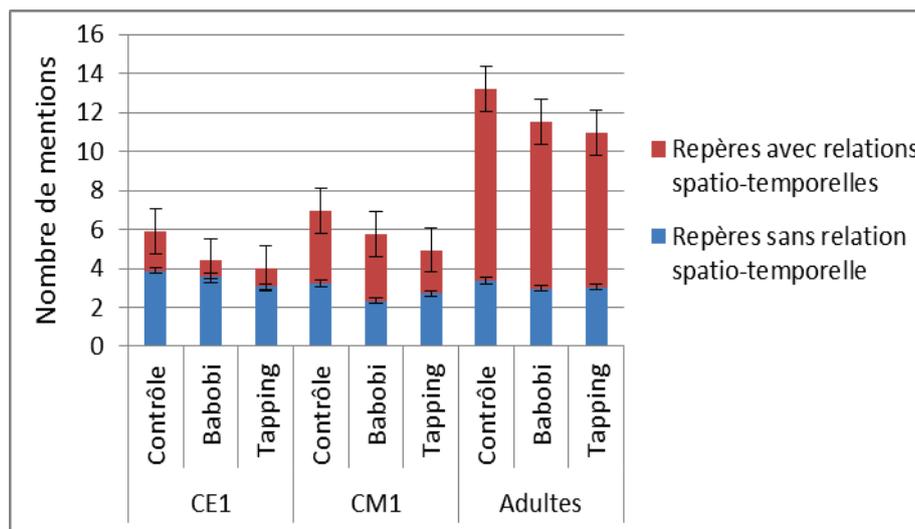


Figure 32 : Nombre moyen de mentions de repères avec vs. sans relations spatio-temporelle en fonction des conditions d'encodage et des groupes d'âges

L'ANOVA à mesures répétées (pour les facteurs Conditions d'Encodage, Relations et Age), présentée Figure 32, met en évidence des effets significatifs de l'âges ($F(2,122)=75,59$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,71$), de la présence ou non de relations spatio-temporelles ($F(1,122)=12,91$; $p<0,001$; $\eta^2=0,17$) et de l'interaction entre ces deux facteurs ($F(2, 61)=50,68$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,62$) . Selon les analyses post-hoc, alors que les CE1 mentionnent plus de repères seuls qu'avec relations spatio-temporelles (seul : $x=3,52$; $SE=0,37$ vs. avec relation spatio-temporelle :

$x=1,24$; $SE=0,44$; $p<0,001$), les CM1 en mentionnent autant (seul : $x=2,76$; $SE=0,37$ vs. Avec : $x=3,13$; $SE=0,30$) et les adultes mentionnent plus de repères avec relations spatio-temporelles (seul : $x=3,11$; $SE=0,30$ vs. avec $x=8,77$; $SE=0,35$; $p<0,0001$).

L'ANOVA à mesures répétées met également en évidence un effet significatif de la condition d'encodage ($F(2, 122)=17,70$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,22$). En particulier, la condition contrôle est mieux réussie que les deux autres (contrôle : $x=4,34$; $SE=0,18$ vs. Babobi : $x=3,61$; $SE=0,17$ et tapping : $x=3,32$; $SE=0,16$; $p<0,0001$). Il n'y a pas d'interaction significative entre l'âge et les conditions d'encodage ni entre les trois facteurs.

○ Influence du rôle des repères : Décisionnels vs. confirmatoires

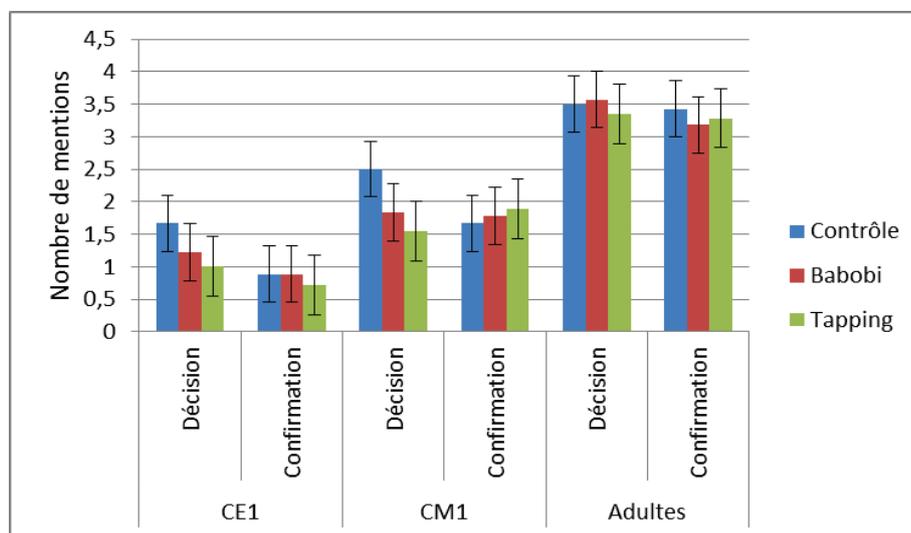


Figure 33 : Nombre moyen de mentions de repères suivant leur position (décisionnel ou de confirmation) en fonction des conditions d'encodage et de l'âge

L'ANOVA à mesures répétées (pour les facteurs Encodage et Position X Age), présentée dans la Figure 33, met en évidence des effets de l'âge ($F(2,122)=87,05$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,74$) et de la position ($F(1,122)=6,18$; $p<0,05$; $\eta^2=0,09$) mais pas d'effet de la condition d'encodage ($F(2,122)=2,99$; $p=0,05$; $\eta^2=0,04$) ou d'interaction entre ces différents facteurs. Les analyses post-hoc permettent de préciser que les performances des CE1 ($x=1,06$; $SE=0,14$) sont significativement inférieures à celles des CM1 ($x=1,87$; $SE=0,14$) qui sont inférieures à celles des adultes ($x=3,39$; $SE=0,11$; $p<0,0001$). Les repères décisionnels sont mentionnés significativement plus souvent que les repères de confirmation (décisionnels : $x=2,24$; $SE=0,09$ vs. Confirmation : $x=1,97$; $SE=0,10$; $p<0,05$).

7.1.2. Reconnaissance visuelle des repères

A) Reconnaissance des items cibles et rejets des items distracteurs différents et similaires

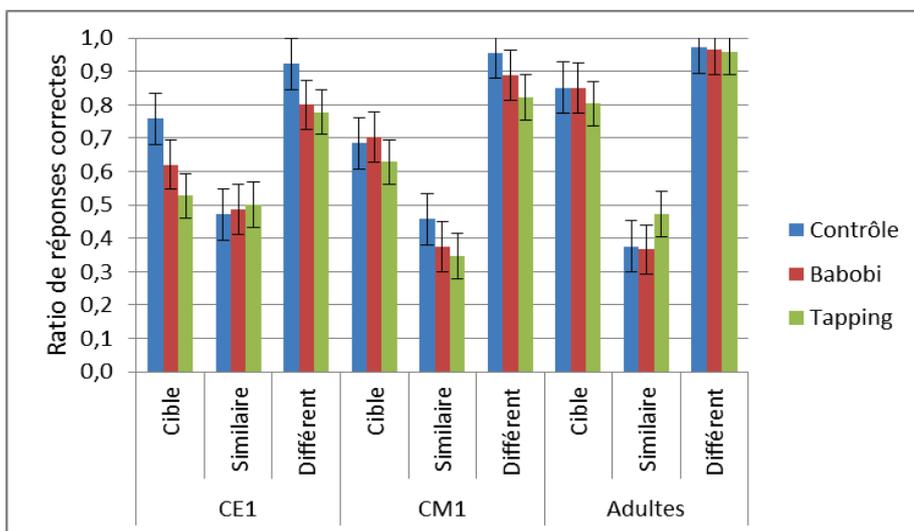


Figure 34 : Taux de cibles (repères) reconnus et de distracteurs similaires et différents correctement rejetés, par groupe d'âge et type d'encodage

L'ANOVA à mesures répétées (pour les facteurs Encodage et Items X Age) met en évidence une différence significative entre les groupes d'âges ($F(2,61)=9,20$; $p<0,001$; $\eta^2=0,23$). Les enfants ont de moins bonnes performances que les adultes (CE1 : $x=0,65$; $SE=0,02$; CM1 : $x=0,65$; $SE=0,02$ vs. adulte : $x=0,73$; $SE=0,01$; $p<0,01$). Il y a également un effet du type d'items ($F(2,122)=130,21$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,68$), le taux de réponses correctes étant plus important pour les distracteurs différents ($x=0,72$; $SE=0,02$) que pour les repères ($x=0,67$; $SE=0,01$; $p<0,0001$) que pour les distracteurs similaires ($x=0,65$; $SE=0,01$; $p<0,0001$). Il y a un effet d'interaction entre l'âge et le type d'items ($F(4,122)=4,71$; $p<0,01$; $\eta^2=0,13$). Le nombre de réponses correctes pour les cibles est plus important chez les adultes que les enfants (CE1 : $x=0,64$; $SE=0,03$; CM1 : $x=0,67$; $SE=0,03$ vs. adultes $x=0,83$; $SE=0,02$; $p<0,01$) alors qu'il n'y a pas de différence significative pour les autres items.

Par ailleurs, comme le montre la Figure 34, l'ANOVA à mesures répétées a également mis en évidence un effet significatif de la condition d'encodage ($F(2,122)=6,42$; $p<0,01$; $\eta^2=0,10$). La condition contrôle est mieux réussie que les deux conditions de double tâche

(contrôle : $x=0,72$; $SE=0,02$ vs. babobi : $x=0,67$; $SE=0,01$ et tapping : $x=0,65$; $SE=0,01$; $p<0,05$). De plus, on observe un effet d'interaction entre l'âge et les conditions d'encodage ($F(4,122)=2,67$; $p<0,05$; $\eta^2=0,08$). Un effet d'interférence du « babobi » ($p<0,05$) et du « tapping » ($p<0,01$) est observé chez les CE1 (contrôle : $x=0,72$; $SE=0,03$; babobi : $x=0,64$; $SE=0,03$ et tapping $x=0,60$; $SE=0,03$). En revanche, chez les CM1 par contre, seule la tâche de tapping produit un effet d'interférence (contrôle : $x=0,70$; $SE=0,03$ vs. tapping : $x=0,60$; $SE=0,03$; $p<0,01$) et aucun effet d'interférence n'est observé chez l'adulte. Enfin, il n'y a pas d'interaction significative entre les types d'items et la condition d'encodage ($F(4,244)=1,99$; $p>0,05$) ni entre les trois facteurs Age*Items*Encodage ($F(8,244)=0,98$; $p>0,05$).

B) Influence du rôle des repères : Décisionnels vs. confirmatoires

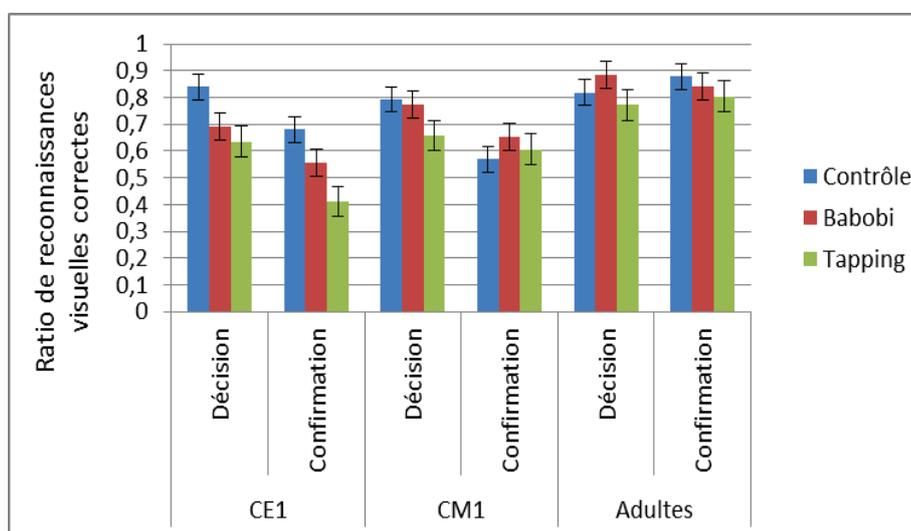


Figure 35 : Taux des repères de décision et de confirmation correctement reconnus pendant le test visuel, par groupe d'âge et type d'encodage

L'ANOVA à mesures répétées (pour les facteurs Encodage et Position X Age), présentée Figure 35, met en évidence des effets significatifs de l'âge ($F(2,61)=14,43$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,32$), et de la position des items ($F(2,122)=19,33$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,24$), les repères décisionnels ($x=0,76$; $SE=0,02$) étant mieux reconnus que les repères confirmatoires ($x=0,67$; $SE=0,02$). Il y a également une interaction significative entre le groupe d'âge et la position des repères reconnus ($F(4,122)=8,00$; $p<0,001$; $\eta^2=0,21$). Les analyses post-hoc permettent de constater l'effet de la position des repères (décisionnels > confirmatoires) chez les enfants ($p<0,001$) mais pas chez les adultes.

L'ANOVA à mesures répétées met également en évidence un effet significatif de la condition d'encodage ($F(2,122)=7,93$; $p<0,001$; $\eta^2=0,12$). L'analyse post-hoc permet de préciser que seul le tapping conduit à une interférence (contrôle : $x=0,76$; $SE=0,02$ vs. tapping : $x=0,64$; $SE=0,03$; $p<0,001$; babobi : $x=0,73$; $SE=0,02$). Il n'y a pas d'interaction significative entre l'âge et les conditions d'encodage ($F(4,122)=2,30$; $p=0,06$; $\eta^2=0,07$) et entre la position des repères et la condition d'encodage ($F(4,244)=0,10$; $p>0,05$) ni entre les trois facteurs Age*Position*Encodage ($F(8,244)=1,04$; $p>0,05$).

7.1.3. Reconnaissance verbale des repères ; influence du rôle décisionnels vs confirmatoire des repères

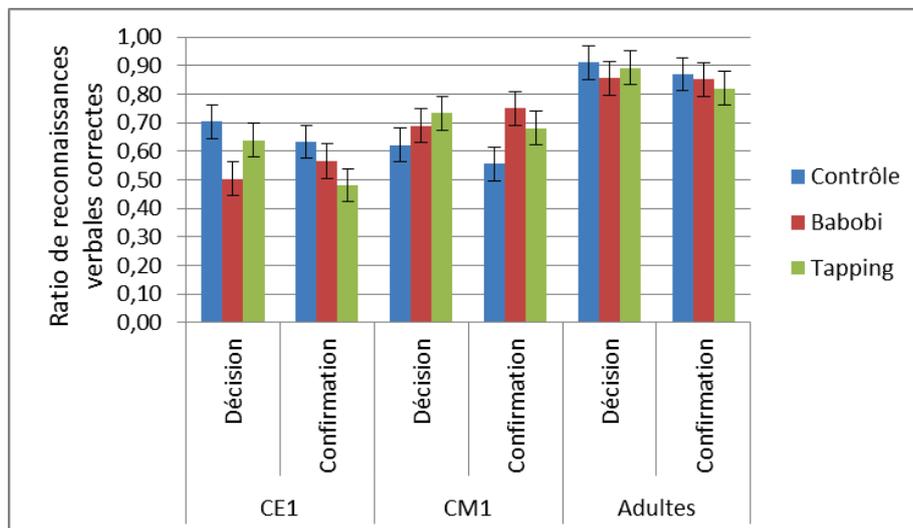


Figure 36 : Taux des repères décisionnels et confirmatoires présentés oralement et correctement reconnus, par groupe d'âge et type d'encodage.

L'ANOVA à mesures répétées (pour les facteurs Encodage et Position X Age), présentée Figure 36, met en évidence des effets significatifs de l'âge ($F(2,61)=35,50$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,54$), et de la position des repères ($F(1,61)=5,99$; $p<0,05$; $\eta^2=0,09$). Les repères décisionnels sont plus facilement reconnus (décisionnels : $x=0,73$; $SE=0,02$ vs. confirmatoires : $x=0,69$; $SE=0,02$). Il n'y a pas d'effet d'interaction entre le groupe d'âge et la position des repères ($F(2,61)=0,39$; $p>0,05$). Les analyses post-hoc de Fisher montrent que les CE1 reconnaissent moins de repères que les CM1 ($p<0,05$) qui en reconnaissent moins que les adultes ($p<0,0001$).

Il n'y a pas d'effet principal de la condition d'encodage ($F(2,122)=0,13$; $p>0,05$) mais un l'interaction entre âge et encodage est significative ($F(4,122)=4,39$; $p<0,01$; $\eta^2=0,13$). Les CE1 manifestent un effet d'interférence du tapping et de la répétition verbale (contrôle : $x=0,67$; $SE=0,04$ vs. tapping : $x=0,56$; $SE=0,04$; $p<0,05$ et babobi : $x=0,53$; $SE=0,04$; $p<0,01$), alors qu'on observe un effet facilitateur chez les CM1 (contrôle : $x=0,59$; $SE=0,04$ vs. tapping : $x=0,71$; $SE=0,04$; $p<0,05$ et babobi : $x=0,72$; $SE=0,04$; $p<0,01$) ; et aucun effet significatif chez les adultes. Il n'y a pas d'effet d'interaction entre la position des repères et la condition d'encodage ($F(2,122)=4,97$; $p>0,05$) ni entre les trois facteurs Age*Position*Encodage ($F(4,122)=0,68$; $p>0,05$).

7.1.4. Connaissance de la route

A) Description des itinéraires : Analyse de la structure des descriptions

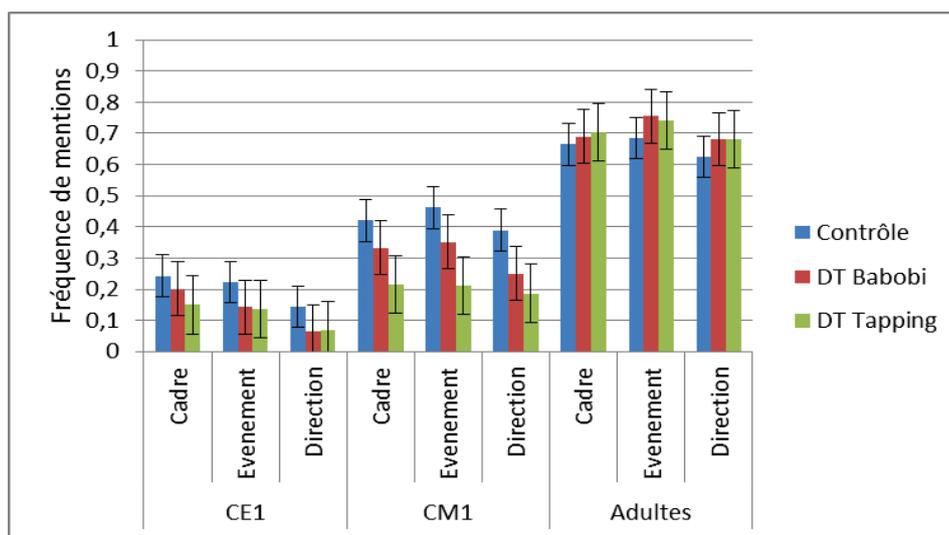


Figure 37 : Fréquence de mentions moyenne du cadre, des événements et des directions/orientations dans les descriptions verbales, par groupe d'âge et type d'encodage

L'ANOVA à mesures répétées (pour les facteurs Encodage et Type X Age), présenté Figure 37, met en évidence une différence significative entre les groupes d'âges ($F(2,61)=196,94$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,87$). Les CE1 mentionnent moins d'informations que les CM1 ($p<0,0001$) qui en mentionnent moins que les adultes ($p<0,0001$). Elle met également en évidence une différence de performances suivant le type d'informations mentionnées ($F(2,122)=19,86$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,25$), en particulier, les informations concernant les directions sont moins fréquemment mentionnées que les deux autres types d'informations (cadre : $x=0,43$;

SE=0,02 et évènement : $x=0,39$; SE=0,02 vs. direction : $x=0,34$; SE=0,02 ; $p<0,0001$). Il y a un effet d'interaction entre l'âge et le type d'informations ($F(4,122)=2,63$; $p<0,05$; $\eta^2=0,08$). Les analyses post-hoc de Fisher montrent que les CE1 et les CM1 mentionnent moins de directions que de cadres ($p<0,05$) et d'évènements ($p<0,01$) alors que les adultes mentionnent plus d'évènements que de cadres ($p<0,05$) et de directions ($p<0,0001$).

L'ANOVA à mesures répétées met en évidence un effet significatif de la condition d'encodage ($F(2,122)=8,19$; $p<0,001$; $\eta^2=0,12$). Il y a en effet une interférence principale du tapping (contrôle : $x=0,43$; SE=0,02 vs. tapping : $x=0,34$; SE=0,02 ; $p<0,01$) mais pas de la répétition verbale. Il y a un effet d'interaction entre l'âge et l'encodage ($F(4,122)=7,81$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,20$). Une interférence du tapping lors de l'encodage est observée chez les CE1 (contrôle : $x=0,20$; SE=0,03 vs. tapping : $x=0,12$; SE=0,03 ; $p<0,05$) et chez les CM1 (contrôle : $x=0,42$; SE=0,03 vs. tapping : $x=0,20$; SE=0,03 ; $p<0,0001$) mais pas chez les adultes. Un effet d'interférence de la répétition verbale est également observée chez les CM1 ($x=0,31$; SE=0,03 $p<0,01$). Il n'y a pas d'interaction entre le type de structure et la condition d'encodage ($F(4,244)=1,60$; $p>0,05$) ni entre les trois facteurs principaux Age*Position*Encodage ($F(8,244)=2,51$; $p>0,05$).

B) Reconnaissance des directions correctes

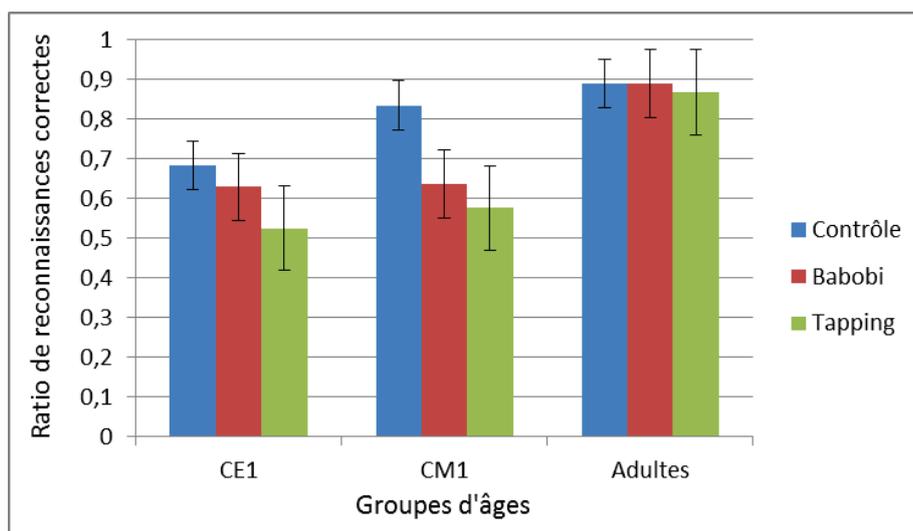


Figure 38 : Taux de reconnaissance des directions correctes par groupe d'âge et type d'encodage

L'ANOVA à mesures répétées, présentée Figure 38, sur le taux de reconnaissance des directions de l'itinéraire suivant la condition d'encodage et l'âge, révèle un effet significatif de l'âge ($F(2,61)=54,16$; $p<0,0001$; $\eta^2=0,64$). Le taux de reconnaissance correcte augmente avec l'âge (CE1 : $x=0,61$; $SE=0,02$ vs. CM1 : $x=0,68$; $SE=0,02$; $p<0,05$ vs. adultes : $x=0,88$; $SE=0,02$; $p<0,0001$). Les performances des enfants sont supérieures au hasard (deux à trois réponses possibles par item) mais restent assez faibles alors que les adultes ont des performances proches du maximum.

L'effet de la condition d'encodage est significatif ($F(2,122)=19,46$; $p>0,0001$; $\eta^2=0,24$) qui est dû à l'effet d'interférence du tapping et du babobi (contrôle : $x=0,80$; $SE=0,02$ versus tapping : $x=0,066$; $SE=0,02$; $p<0,001$; versus babobi : $x=0,72$; $SE=0,02$; $p<0,001$). L'effet d'interaction Age*Encodage est également significatif ($F(4,122)=5,57$; $p<0,01$; $\eta^2=0,15$). Alors qu'un effet d'interférence de la répétition verbale est observé uniquement chez les CM1 ($p<0,001$), un effet d'interférence du tapping est obtenu chez les CE1 ($p<0,0001$) et les CM1 ($p<0,0001$), mais pas chez les adultes.

7.2. Analyse des corrélations entre les effets d'interférences observés sur les mesures de l'itinéraire et les mesures des habiletés cognitives et linguistiques

Des analyses de corrélations partielles entre les effets d'interférences visuo-spatiale (« tapping ») et verbale (« babobi ») sur les performances aux épreuves de l'itinéraire et celles des épreuves complémentaires ont été réalisées en contrôlant de l'effet de l'âge. Rappelons que les effets d'interférence correspondent à la différence observée entre les performances à une épreuve dans la condition contrôle et dans la condition interférente. Suite à la correction de Bonferroni, aucune corrélation ne s'est révélée significative. Les effets d'interaction sont en effet faibles, aussi même si ces effets d'interférence peuvent être influencés par les compétences générales des participants, un nombre plus important d'individus serait nécessaire pour que les corrélations soient significatives.

8. Discussion – Conclusion

Cette troisième expérience avait pour objectif d'évaluer les composantes cognitives et linguistiques impliquées dans la construction de représentations mentales d'itinéraires chez l'enfant et chez l'adulte. L'augmentation quantitative et qualitative des connaissances spatiales avec l'âge observée dans des tâches verbales comme visuo-spatiales des deux premières expériences nous ont conduit à émettre l'hypothèse d'une représentation spatiale mixte, constituée de différents formats ou composantes (verbale et visuo-spatiale). La composante principalement utilisée évoluerait avec l'âge. En effet, alors que les jeunes enfants utiliseraient principalement un format visuo-spatial, les adultes utiliseraient conjointement les deux formats en favorisant un format verbal.

Une méthodologie spécifique a été utilisée au cours de cette expérience, permettant de limiter l'accès et le maintien d'informations verbales ou visuo-spatiales lors de la mémorisation. L'implication de la mémoire de travail dans la construction de représentation d'itinéraire chez les enfants a déjà été évoquée par Fenner et al. (2000) et Purser et al. (2012), et nous avons cherché à l'évaluer plus directement dans cette troisième expérience. Nous nous sommes intéressés au rôle de la boucle phonologique et du calepin visuo-spatial de la mémoire de travail dans la mémorisation d'itinéraires virtuels chez des enfants de CE1 (8 ans) et de CM1 (10 ans) et chez des jeunes adultes. La tâche concurrente spatiale est un mouvement itératif («tapping»), la tâche verbale est une suppression articulatoire (répétition des syllabes «babobi»). Comme dans les deux expériences précédentes, les connaissances de type repère et de type route de l'itinéraire ont été évaluées par des épreuves de production et de reconnaissance verbale et visuo-spatiale.

Le développement des connaissances spatiales

La construction d'une représentation spatiale peut être facilitée par la présence de repères (Fenner et al., 2000 ; Jansen-Osmann et al., 2007 ; Bullens et al., 2010). Bien qu'on observe une utilisation précoce des repères, ces connaissances évoluent avec l'âge, permettant leur utilisation dans des situations de plus en plus complexes. Dans l'expérience 3, la connaissance des repères a été évaluée au travers d'une description verbale, une tâche de reconnaissance verbale et une tâche de reconnaissance visuelle. L'analyse de la description verbale montre une augmentation qualitative et quantitative des termes employés. Les plus jeunes enfants mentionnent principalement des termes «génériques» (ex. «des maisons») et seulement quelques repères. En cohérence avec l'expérience 1, la production de repères

augmente avec l'âge alors que la production de termes « génériques » moins précis diminue. De plus, la fréquence d'utilisation de termes « vecteurs » (ex. « la route ») augmente avec l'âge. L'ensemble de ces termes (génériques, vecteurs et repères) sont principalement introduits par des déterminants indéfinis (appropriés pour les premières mentions) à tous les âges. L'utilisation de déterminants définis quant à elle semble évoluer qualitativement, ciblant de plus en plus des éléments spécifiques d'une ville comme « la poste », pour lesquels ces déterminants sont appropriés.

Par ailleurs, les repères mentionnés sont de plus en plus souvent accompagnés de relations spatio-temporelles, montrant que les enfants apprennent graduellement à expliciter des liens entre les éléments et leur emplacement dans l'espace. La capacité croissante à exprimer de façon explicite la configuration de l'environnement est vraisemblablement liée à l'effet du rôle des repères (décisionnel vs. confirmatoire). Dans l'étude de Cohen et Schuepfer (1980) et de Jansen-Osmann et Wiedenbaureur (2008), les repères décisionnels étaient mieux mémorisés par les participants, enfants comme adultes. Dans notre expérience, l'influence de la position du repère a été évaluée et observée dans trois épreuves distinctes (description verbale, reconnaissance verbale et reconnaissance visuelle) mais uniquement chez les enfants, les adultes réussissant facilement à reconnaître les deux types de repères.

Lors de la reconnaissance visuelle des repères, des images cibles (repères), distracteurs similaires (même dénomination qu'une cible) et des distracteurs différents étaient présentés. Au cours du développement, les repères sont de mieux en mieux reconnus et les distracteurs différents sont de plus en plus correctement rejetés. Toutefois, en cohérence avec les résultats de nos expériences précédentes, les distracteurs similaires sémantiquement sont de plus en plus souvent reconnus à tort. Malgré l'amélioration des capacités de reconnaissance des repères, l'effet de biais de dénomination est ici encore observé. La reconnaissance des repères présentés visuellement serait donc réalisée en partie grâce à la mémorisation des éléments sous un format verbal.

Concernant la connaissance de la route évaluée au travers de la description verbale de l'itinéraire, les participants mentionnent moins de directions que de cadres et de mouvements. Les informations fournies sont donc de plus en plus riches. La reconnaissance des directions augmente également avec l'âge.

Des augmentations progressives sont donc observées dans les différentes tâches utilisant aussi bien des informations verbales que visuelles. Le rôle des composantes verbales et/ou visuo-

spatiales de la mémoire de travail au cours de la mémorisation d'itinéraires va être présenté en fonction de ces deux formats de restitution et du contenu de la connaissance.

Les effets d'interférence

Nos résultats indiquent que les mentions des repères dans les descriptions verbales sont sensibles aux effets d'interférences verbale et spatiale. En effet, le nombre d'introductions, par les enfants, de repères indéterminés et de repères accompagnés d'une relation spatiale diminuent lors des deux tâches interférentes. Celles-ci affectent également le nombre de vecteurs mentionnés par les adultes. Les deux composantes verbale et spatiale de la mémoire de travail semblent donc jouer un rôle dans la mémorisation des repères situés dans le temps et/ou l'espace (accompagnés de prépositions spatiales), indépendamment de leur rôle décisionnel ou confirmatoire dans l'itinéraire. Nos résultats sont donc cohérents avec ceux de l'étude de Pazzaglia et al., (2006), malgré des supports de mémorisation différents entre nos études. En effet, suite à une mémorisation de descriptions verbales d'itinéraires en double tâche (verbale et visuo-spatiale), elles ont observé un effet d'interférence des deux doubles tâches dans le rappel d'itinéraires.

Concernant les performances de reconnaissance visuelle des repères, les résultats montrent que la tâche de tapping affecte la reconnaissance des repères cibles et le rejet des distracteurs différents chez les enfants, les performances diminuant dans cette condition par rapport à la condition contrôle. Cet effet d'interférence suggère que la composante spatiale de la mémoire de travail est utilisée par les enfants de CM1 pour la mémorisation des images des repères de l'itinéraire virtuel. La suppression articulatoire quant à elle a un effet interférent sur la reconnaissance des repères, mais uniquement chez les CE1. Une interprétation serait que les CE1 utiliseraient les deux composantes pour mémoriser les images des repères alors que les enfants de CM1 utiliseraient uniquement ou majoritairement la composante spatiale, ce qui est contradictoire avec nos observations précédentes concernant l'évolution d'une représentation plus fondée sur les informations visuo-spatiales évoluant vers une représentation faisant davantage appel à un codage verbal.

Dans la cette même tâche de reconnaissance verbale des repères aucun effet de double tâche n'est observé chez l'adulte mais un effet différent est observé chez les enfants. En effet, chez les CE1, la reconnaissance des repères présentés verbalement diminue avec la réalisation du tapping pour les repères confirmatoires, et avec la répétition verbale pour les repères

décisionnels. Il semblerait donc que les enfants les plus jeunes, utilisent des stratégies différentes selon le rôle du repère. Afin de mémoriser les repères confirmatoires – repères les moins importants –, ils utiliseraient une stratégie visuo-spatiale pouvant s'appuyer sur les images mentales. Pour mémoriser les repères décisionnels, par contre, les enfants utiliseraient une stratégie verbale dont la réalisation est perturbée par la répétition concurrente de syllabes. À l'inverse, les performances aux repères de confirmations augmentent chez les CM1 lors d'un encodage en double tâche (visuo-spatiale ou verbale). Cette augmentation des performances lors de doubles tâches peut-être due à une plus grande motivation et concentration de la part des enfants. En effet, les enfants ont trouvé la mémorisation en double tâche ludique. Ce résultat peut également être un artefact produit par les variations de réponses intra-individuelles. Le rôle de la position des repères est également confirmé; les repères décisionnels sont de nouveau plus facilement reconnus que les repères confirmatoires, sans que cette différence ne varie selon les tâches d'interférence.

Toutefois, l'effet de facilitation chez les CM1 n'est observé que pour la reconnaissance verbale et non pour la reconnaissance visuelle, ce qui conduit à interroger la généralité de l'effet facilitateur observé chez les CM1. Aucune interférence n'est observée chez les adultes pour la reconnaissance visuelle des repères. Ceci est conforme à ce qui avait été observé dans l'étude de Gras et al. (2013), alors que des effets d'interférence se manifestaient sur d'autres mesures.

Avec les trois tâches de restitution évaluant les connaissances des repères, des effets de double tâche verbale et visuo-spatiale sont donc constatés ce qui confirme de nombreuses observations chez l'adulte (ex. Garden et al., 2002; Meilinger et al., 2008; Pazzaglia et al., 2010). Toutefois, dans notre expérience ces effets sont principalement observés chez l'enfant, notamment avec la tâche concurrente de tapping. De plus, de légères différences semblent être observées selon le type de tâche. En effet, en ce qui concerne les mentions des repères dans les descriptions verbales, des effets d'interférence sont uniquement observés dans l'utilisation adaptée de déterminants et de relations spatiales. Les effets d'interférence sont également présents dans la reconnaissance visuelle mais sont peu observés dans la reconnaissance verbale. L'influence de la congruence entre le matériel mémorisé (une vidéo c'est-à-dire une information visuo-spatiale) et la restitution semble conforme aux résultats de Picucci et al. (2013). Outre ces effets liés au type de tâche ou au format de matériel, des différences sont observées selon l'âge. Alors que les enfants les plus jeunes (de 8 ans) voient leurs performances fortement diminuées lors de tâches concurrentes, les enfants plus âgés (de 10 ans) voient moins leurs performances diminuées. Enfin, les adultes présentent uniquement un effet d'interférence verbale et spatiale sur leur performance de production verbale.

Concernant la connaissance de la route évaluée au travers de la description verbale de l'itinéraire, les mentions sont touchées par l'interférence spatiale du tapping chez les enfants. Les enfants de CE1 et de CM1 utiliseraient donc la composante spatiale de la mémoire de travail pour mémoriser la route d'un itinéraire. La suppression articulatoire diminue également la richesse des informations fournies par les CM1. Les enfants deviendraient plus précis ou parviendraient à se souvenir de davantage d'informations grâce à une stratégie de recodage verbal que la répétition de syllabes restreint. Aucun effet de double tâche n'est observé chez les adultes.

Enfin, la reconnaissance des directions augmente également avec l'âge et ces performances sont sensibles à une interférence spatiale chez les enfants. Ce résultat confirme l'implication de la composante spatiale chez tous les groupes des enfants lors de la mémorisation du déroulement de l'itinéraire et donc de la mémorisation des directions empruntées. La suppression articulatoire diminue les performances des enfants de CE1 mais pas des autres participants. Les CE1 utiliseraient donc les deux composantes de la mémoire de travail : dès que l'une ou l'autre d'entre elles est perturbée, leur apprentissage l'est également. Un codage verbal et spatial serait donc utilisé précocement mais serait sensible à des effets de concurrence. Il semblerait alors que les CM1 arrivent à compenser une demande verbale ce qui n'est pas le cas d'une demande spatiale lors de la mémorisation des directions; la mémorisation par la composante spatiale est donc indispensable à la mémorisation des directions. Ici encore les adultes arriveraient à compenser l'utilisation de l'une ou l'autre des composantes de la mémoire de travail lors de la mémorisation des directions d'un itinéraire. Peu d'études en double tâche se sont intéressées aux mentions et à la reconnaissance des directions. Chez l'adulte, Garden et al. (2002) ont observé une interférence des deux doubles tâches sur la mémorisation de segments d'itinéraires tâche assez proche de notre épreuve de reconnaissance des directions. Deyzac et al. (2006) avaient, quant à eux, principalement observé une interférence du tapping sur l'introduction de repères et de directions sur une carte.

Ainsi, des effets d'interférence verbale et spatiale ont été observés dans la restitution de connaissances de type repère et de type route. Cela suggère que les composantes verbale et spatiale de la mémoire de travail sont impliquées dans la mémorisation d'informations spatiales séquentielles. Ces effets d'interférence varient toutefois selon la tâche concurrente, la connaissance évaluée et le support utilisé pour l'évaluer et l'âge du participant. Alors que la tâche de tapping semble avoir un effet d'interférence sur les connaissances des repères et de type

route, l'effet de la répétition verbale semble principalement affecter la connaissance des repères. Un effet de congruence du support est également attesté, avec un effet du tapping observé surtout sur les performances à des épreuves visuo-spatiales. Enfin, les effets d'interférence sont essentiellement observés chez les enfants. Cette différence d'effet entre les enfants et les adultes peut s'expliquer de deux façons. Tout d'abord, les épreuves de double tâche monopolisent l'attention or les enfants ont des capacités d'attention plus faibles que celles des adultes. S'ils n'arrivent pas à diviser leur attention efficacement, cela explique qu'ils soient plus sensibles aux interférences que les adultes, mais cela renforce également l'idée d'implication de ressources communes entre la tâche de mémorisation et les tâches concurrentes et donc le rôle des composantes de la mémoire de travail dans la mémorisation des itinéraires.

Par ailleurs, si ces composantes sont bien mobilisées, nos résultats suggèrent que les adultes arriveraient à compenser ces interférences. En effet, certaines épreuves semblent montrer un effet plafond; si les adultes considèrent la tâche d'apprentissage comme peu coûteuse, ils arriveraient facilement à réaliser une autre tâche, même si celle-ci implique des traitements ou formats d'encodage similaires. La facilité relative des itinéraires pour les adultes expliquerait qu'ils ne soient pas sensibles aux doubles tâches pour réussir la plupart de nos épreuves de restitution, alors que de tels effets d'interférence sont généralement rapportés dans la littérature. De plus, alors que l'épreuve de tâche concurrente de tapping semblait difficile pour les enfants, nécessitant parfois de la concentration, elle s'automatisait rapidement chez l'adulte. La tâche de répétition verbale s'automatisait par contre rapidement dans tous les groupes mais malgré cette automatisation, certaines performances diminuent même chez les adultes. L'automatisation de la tâche concurrente ne suffit donc pas à expliquer l'ensemble des effets d'interférence. Elle peut toutefois en partie expliquer que l'interférence spatiale semble plus importante que l'interférence verbale.

Par ailleurs, contrairement à nos hypothèses, les effets d'interférence ne sont pas significativement corrélés avec les capacités cognitives générales que nous avons considérées. Cette absence d'effet peut être attribuée aux faibles effets d'interférence et au nombre restreint de participants. Il serait donc intéressant de réaliser ultérieurement d'autres analyses auprès d'échantillons plus importants, afin de distinguer des groupes de participants, à différents âges, possédant de faibles vs. fortes habiletés visuo-spatiales comme cela a été fait chez l'adulte (ex. Garden et al., 2002 ; Gyselinck et al., 2007 et 2009)

En conclusion, outre une progression de la connaissance des repères et de la route avec l'âge; cette étude a mis en évidence des effets de doubles tâches. Les deux composantes (verbale et spatiale) de la mémoire de travail semblent donc être impliquées dans la construction de représentation d'itinéraires. Toutefois, les effets semblent varier selon la connaissance évaluée, le matériel utilisé et l'âge des participants. Premièrement, le calepin visuo-spatial semble impliqué dans les connaissances des repères et de la route, alors que la boucle phonologique serait utilisée uniquement dans certain cas, par exemple selon la congruence entre les supports utilisés ou encore par la difficulté de réalisation de la tâche, comme pour le tapping chez les enfants. De plus, nous avons pu observer que les enfants les plus jeunes sont plus sensibles aux effets d'interférence que les autres groupes de participants plus âgés. À l'inverse, peu d'effets d'interférence ont été observés chez les adultes. Seules les performances de production de repères accompagnées par l'expression des relations spatiales et de vecteurs diminuent significativement lors de doubles tâches chez l'adulte, probablement dû à la facilité des itinéraires pour eux, qui leur permet de gérer les doubles tâches. Enfin, alors que la connaissance des repères par les enfants est sensible aux deux doubles tâches, la connaissance des directions est principalement sensible à l'interférence spatiale. Cet ensemble de résultats suggère que les enfants s'appuient principalement sur la composante visuo-spatiale de leur mémoire de travail pour construire une représentation d'un itinéraire présenté visuellement, et que la composante verbale est mise en jeu plus progressivement.

Partie III : Discussion et conclusion générale

Ce travail de thèse s'est intéressé au développement des représentations spatiales d'itinéraires virtuels, chez l'enfant comme chez l'adulte, en considérant les dimensions cognitives et langagières des représentations. L'acquisition et la restitution d'une représentation d'itinéraires peuvent en effet utiliser des supports variés impliquant aussi bien des informations verbales que visuo-spatiales. Des processus de traitement de l'information distincts pourraient donc être mobilisés. Cette diversité de supports et de traitements engendre de nombreuses questions sur la représentation que construit. Par exemple, est-ce que ces différentes formes d'information conduisent à une unique représentation comprenant différentes composantes ou dimensions d'informations équivalentes ou complémentaires ? Est-ce que la représentation va être réalisée sous un seul ou plusieurs formats ? S'il existe différentes représentations, sont-elles équivalentes ? Permettent-elles de construire des connaissances de l'environnement et une navigation aussi efficace ? Le rôle des dimensions cognitives visuo-spatiales et langagières est longuement discuté.

Un environnement spatial implique le traitement d'informations spatiales. Ainsi, une visuo-spatiale peut être considérée comme inhérente aux représentations spatiales d'itinéraires. Cependant, une distinction entre différents types de connaissances spatiales qui pourraient être indépendantes les unes des autres est réalisée. Une distinction a été faite entre les connaissances et manipulations de petite échelle – dont l'ensemble est visible en une fois – et celles qui concernent les grandes échelles, comprenant notamment la représentation d'itinéraires (Quaiser-Pohl et al., 2004). Plus récemment, certains chercheurs ont d'ailleurs proposé une distinction entre mémoire de travail spatiale locale, correspondant à la composante décrite par Baddeley et al. (2011), et la mémoire de travail de navigation, impliquant le traitement d'informations de plus grande échelle (Piccardi et al., 2014). Une des questions est de savoir si les représentations et les processus mis en œuvre pour ces deux types d'espaces d'échelle différente sont identiques. Dans notre étude, nous nous sommes focalisé sur la représentation de grands espaces mais avons également pris en compte celle des petits espaces. Ainsi, à la lueur de nos résultats, cette question pourra être soulevée.

Un environnement spatial et sa représentation mettent en jeu également des informations verbales. Cette dimension verbale est par exemple à la base du concept de modèle mental de

Johnson-Laird (1983). Le rôle du langage dans la cognition spatiale, et plus largement dans la cognition, est également débattu. Certains auteurs considèrent que l'acquisition du langage joue un rôle fondamental dans le développement cognitif et que les propriétés spécifiques de chaque langue pourraient même influencer la sélection et l'organisation des informations (ex. Slobin, 2006 ; Soroli et al., 2011). D'autres, au contraire, conçoivent la cognition spatiale comme relevant de connaissances innées et indépendantes de l'acquisition du langage et/ou de langues spécifiques (Gennari et al., 2002 ; Papafragou & Selimis, 2010).

Dans cette thèse, le rôle des dimensions verbales et visuo-spatiales est évalué à trois niveaux : 1) du point de vue du support de restitution des connaissances de l'itinéraire, 2) par l'analyse des différences interindividuelles, c'est-à-dire des liens entre les capacités de représentation d'itinéraires et les habiletés cognitives et langagières des individus ; et 3) par l'étude de l'implication de la mémoire de travail. Le rôle de ces composantes est étudié au cours du développement cognitif et langagier de l'enfant. Afin de contribuer à une meilleure compréhension des processus d'acquisition de nouvelles représentations spatiales, trois expériences ont été réalisées chez des enfants de 5 à 11 ans et chez des jeunes adultes. Dans un premier chapitre, les résultats de ces études seront résumés et leurs implications discutées. Nous concluons ensuite cette thèse par un deuxième chapitre présentant les conclusions et perspectives qu'ouvre l'ensemble de ces recherches.

Chapitre 7: Discussion

1. Le développement des connaissances spatiales

Nous nous sommes intéressés à trois types de connaissances, toutes essentielles pour la capacité à élaborer des représentations d'itinéraires : connaissances des repères, de type route, et de type survol (Golledge, 1987). Nous nous sommes centrés en particulier sur le développement des connaissances concernant les repères et la route au cours de l'enfance, lors de la mémorisation d'itinéraires virtuels.

1.1. Les résultats de nos études

Dans nos trois expériences, la connaissance des repères a été mesurée par trois tâches de production et de restitution verbales et visuo-spatiales : (1) des descriptions verbales ; (2) la reconnaissance des repères à partir d'images; et (3) la reconnaissance des repères à partir de leur dénomination.

Pour l'ensemble des études, il était demandé aux participants de décrire l'itinéraire précédemment vu à une tierce personne ne connaissant pas la ville afin que celle-ci puisse ensuite réaliser elle-même l'itinéraire. Nous avons d'abord vérifié si la loquacité des participants pouvait intervenir dans les productions. Celle-ci augmente effectivement avec l'âge, résultant en une augmentation importante et progressive du nombre de mentions d'éléments de la ville. Toutefois, tout en tenant compte de cette variable, une analyse qualitative des termes mentionnés nous a permis d'observer une évolution dans le type d'éléments mentionnés. Ainsi, les plus jeunes enfants (de 6 ans) mentionnent principalement des termes génériques, c'est-à-dire des éléments non distinctifs et non pertinents pour l'itinéraire (souvent au pluriel, par exemple « des voitures »). Avec l'âge, le nombre de termes génériques diminue au profit de mentions de vecteurs, c'est-à-dire d'éléments utilisés comme support à la navigation (comme « une route ») et surtout de repères, pour atteindre progressivement le même type de description d'itinéraire (basée sur les vecteurs et les repères) que les adultes. Les informations mentionnées sont donc de

plus en plus spécifiques. Par ailleurs, dès 6 ans, les repères, vecteurs ou termes génériques sont introduits à l'aide de déterminants indéfinis, c'est-à-dire de manière appropriée (ex. « il y a un magasin »). Lorsque les déterminants définis sont utilisés, ils désignent chez les enfants les plus jeunes majoritairement des vecteurs (ex. « le passage piétons » ou « la route ») puis chez les enfants les plus âgés ou chez les adultes, principalement des repères, c'est-à-dire des éléments spécifiques comme « la poste ».

Outre cette augmentation de la précision des termes utilisés, reflétant une sélection de plus en plus adaptée des entités pertinentes pour l'itinéraire, on observe aussi une contextualisation progressive des repères avec l'âge. En effet, avec l'âge, les repères sont de plus en plus souvent situés dans l'espace ou le temps, ce qui se manifeste par l'utilisation d'un marqueur exprimant une relation spatiale ou temporelle (par exemple « devant la mairie », « et après la boulangerie »). Les descriptions spatiales correspondent chez les enfants les plus jeunes à une énumération d'éléments, puis deviennent peu à peu plus riches et structurées, comme l'avait déjà observé Robin (2002). Cette structuration est également observée par le choix des repères mentionnés. En effet, les repères situés à un changement de direction (i.e. repères décisionnels) sont plus souvent mentionnés que les repères rencontrés sur le chemin mais qui ne sont pas situés à un changement de direction (i.e. repères confirmatoires). Dans la première expérience, l'impact du rôle des repères sur leur mention apparaît seulement à partir de 10 ans alors qu'il apparaît dès huit ans dans la troisième expérience. Cette différence entre les deux études peut s'expliquer par la plus grande longueur de l'itinéraire utilisé dans la première expérience (presque un tiers de temps en plus), comportant par conséquent plus de changements de directions (trois carrefours en plus). L'itinéraire de la première expérience comporte donc plus d'informations à traiter et à mémoriser que les itinéraires de la troisième expérience, nécessitant de façon encore plus soutenue de mettre en œuvre une sélection des informations pertinentes. Cette explication est conforme à l'étude de Jansen-Osmann (2007), montrant que la complexité de la configuration des itinéraires influence la représentation de l'environnement des enfants.

On retrouve l'effet du rôle des repères dans les résultats aux épreuves de reconnaissance visuelle des repères des trois expériences : les repères décisionnels sont mieux reconnus que les repères confirmatoires malgré un effet plafond observé chez l'adulte dans les deuxième et troisième études. Des résultats similaires sont observés lors de la reconnaissance verbale des repères des deuxième et troisième études. L'effet de la position des repères observé lors des descriptions verbales serait donc bien lié à une différence de connaissance des repères suivant le rôle qu'ils jouent dans l'itinéraire. Des informations communes concernant les repères seraient utilisées pour répondre aux tâches de reconnaissance visuelle, de reconnaissance verbale et pour

la production verbale des repères. Ces résultats soutiennent l'idée que les repères décisionnels jouent un rôle particulier dans l'élaboration des représentations d'itinéraires, car ils sont considérés comme les plus importants pour une navigation efficace (Michon & Denis, 2012).

La connaissance de la route a été examinée dans les productions verbales, la vérification de phrases et le test de choix de directions. Dans les descriptions verbales de la première expérience, la connaissance route a été analysée en fonction de l'indication des carrefours et des orientations prises à ces carrefours. Nous avons observé une augmentation avec l'âge des mentions de ces deux informations. La fréquence des mentions de carrefours et de leur orientation est également corrélée avec la capacité à reconnaître les directions à prendre. Dans notre troisième étude, les connaissances de type route ont été évaluées par les mentions des événements (ou actions), de leur cadre (localisation de l'événement) et de leur direction (orientation de l'action ou du cadre). Le nombre de mentions correctes de ces informations augmente progressivement avec l'âge et à 8 ans, les trois types d'informations sont mentionnés. Toutefois, alors que les adultes construisent leurs descriptions autour des événements, les informations fournies par les enfants sont peu reliées entre elles. On observe donc une évolution quantitative des informations fournies mais également une évolution qualitative pouvant refléter des différences de structuration de la représentation mentale de l'environnement. Ces connaissances de la route sont fortement liées à la capacité de mentionner des repères décisionnels : plus une personne mentionne de repères décisionnels, mieux elle indique les directions. Cela renforce donc encore le rôle particulier occupé par les repères qui sont liés à un changement de direction dans les descriptions verbales (Denis, 2012).

La première expérience a évalué la connaissance de la configuration, comprenant : la répartition des repères et l'indication de l'itinéraire sur la carte. Il s'agit donc d'informations pouvant être considérées comme relevant d'une connaissance de type survol. La mention et le placement de repères sur une carte est difficile pour les enfants les plus jeunes (de 6 et 8 ans), et dans une moindre mesure pour les enfants les plus âgés et pour les adultes. En effet, seuls quelques repères sont cités et placés par les enfants. De plus, les adultes mentionnent et placent en moyenne uniquement six repères sur la carte alors qu'ils en indiquent environ quatorze au cours de leur description verbale. Quatre explications peuvent rendre compte de cette difficulté. Premièrement, il est possible qu'un support de type carte soit difficile à comprendre, mais selon Peter et al. (2010) les enfants de 6 ans comprennent et peuvent utiliser des cartes. Deuxièmement, les critères de cotation peuvent être mis en cause, ceux-ci étant plus stricts avec les cartes que dans la description verbale. Troisièmement, ces faibles performances peuvent être liées à la difficulté d'associer un élément avec son emplacement. En effet Bauer et al. (2012)

montrent que malgré une acquisition précoce (dès quatre ans) de la connaissance d'événements ou de placements, seuls les enfants de huit ans arrivent à relier ces deux informations. Les faibles performances de placement d'éléments sur la carte seraient donc liées à des difficultés à associer un repère avec sa position. Enfin, cette épreuve évalue une connaissance de la configuration globale de l'environnement associée à une connaissance de type survol. Or cette connaissance est souvent considérée comme difficile chez les personnes présentant de faible capacité de représentation spatiale, expliquant que la difficulté soit observée à tous les âges.

La difficulté de traitement des informations de configuration n'est cependant pas observée pour le tracé de l'itinéraire sur la carte. En effet, les informations de directions indiquées sur la carte sont aussi nombreuses que celle de la description verbale, c'est-à-dire qu'il y a autant de directions correctement indiquées dans la carte que de directions mentionnées dans la description verbale. Par conséquent, les participants ont réussi à utiliser correctement ce support. Toutefois, il est possible que pour résoudre la tâche, les participants aient pu utiliser une stratégie de type route c'est-à-dire leur connaissance de la séquence des événements et qu'ils ne se soient pas exclusivement appuyés sur leur connaissance de la configuration globale, de type survol.

Nous avons donc observé dans ces trois études une amélioration progressive de la précision, de la pertinence, la variété et de la quantité d'informations spatiales mémorisées au cours du développement. Une description considérée comme « bonne » étant composée d'un ensemble d'informations variées (Hund & Padgitt, 2010), l'augmentation de la diversité des informations mentionnées permet d'attester que la qualité de la description augmente avec l'âge. De plus, la connaissance des informations verbales et visuo-spatiales des repères et des directions devient de plus en plus précise. La connaissance des repères est influencée par l'emplacement du repère et donc son rôle décisionnel ou confirmatoire au sein de l'itinéraire. Cette connaissance de la position des repères, notamment la connaissance des repères décisionnels, est liée à la connaissance de la route et de survol.

1.2. Implications théoriques

Selon l'hypothèse notamment de Siegel et White (1975), les enfants acquièrent d'abord la connaissance des repères puis celle de type route et enfin celle de type survol. Cette hypothèse d'une progression linéaire et graduelle a été partiellement validée par Cousin et al. (1983), mais

aussi remise en question à la lumière de certaines capacités très précoces d'utilisation d'informations de type survol (ex. Huttenlocher et al., 2008).

Tous les modèles disponibles, ainsi que nos études, distinguent les connaissances de type repère et celles de type route. Toutefois, l'existence même de cette distinction mérite discussion. En effet, un repère est considéré comme un élément saillant de par ses caractéristiques physiques, sa signification symbolique ou socio-culturelle mais également sa position ou son rôle au sein d'un environnement. Par conséquent, il n'exerce son rôle de repère qu'en fonction de sa relation aux autres éléments de l'environnement, et en fonction de l'objectif de la représentation spatiale (ex. « aller à la mairie »). La connaissance d'un repère comportera donc sa situation par rapport à un autre repère, un élément structurel de l'environnement ou par rapport à la position de l'observateur. Identifier un repère dans un itinéraire revient à positionner les entités dans un ordre séquentiel, les uns par rapport aux autres. Or cet aspect séquentiel est la base d'une connaissance de type route, souvent définie par une connaissance de séquences d'actions et de repères.

Pour éviter cette confusion, il ne faudrait pas considérer la distinction entre les repères et la route mais plutôt entre les repères et les actions, dans le sens d'intégration du chemin permis par un mouvement avéré (vécu) ou imaginaire. La combinaison de ces deux connaissances distinctes permettrait alors de construire aussi bien une connaissance de type route, c'est-à-dire d'une séquence d'actions et de repères, selon un point de vue égocentré, qu'une connaissance de la configuration générale de l'environnement, c'est-à-dire une connaissance de type survol, selon un point de vue allocentrique comme je le propose dans la Figure 39. Ainsi, un individu acquerrait initialement, d'une part, les connaissances des repères orientés et, d'autre part, des connaissances d'actions dirigées, notamment de changements de directions selon les informations qu'il perçoit, qu'on lui transmet ou qu'il imagine. L'association de ces deux connaissances lui permettrait de développer une connaissance séquentielle de mouvements associés à des repères et/ou d'une connaissance de la configuration entre les différents éléments. Plus les interactions entre les connaissances des repères et de mouvements intégrés sont importantes, plus les visions route et/ou survol sont complètes. Par ailleurs ces connaissances de second niveau de représentation interagiraient, de telle sorte que l'acquisition de l'une faciliterait l'acquisition de l'autre.

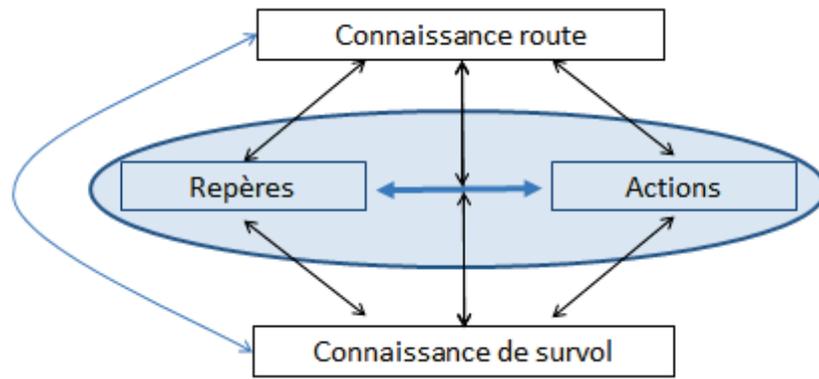


Figure 39 : De la connaissance des repères et des actions aux connaissances de types route et survol

Cette vision peut tout à fait s'intégrer au modèle proposé par Jansen-Osmann (2007), comme illustré dans la Figure 40, en remplaçant la connaissance des repères par celle des repères et des actions ou en ajoutant la connaissance des actions (et donc des changements de direction). Ainsi, la perception d'actions permettrait de développer des connaissances des mouvements, qui seraient intégrées aux connaissances spatiales. Elle fournirait ainsi des informations permettant de naviguer.

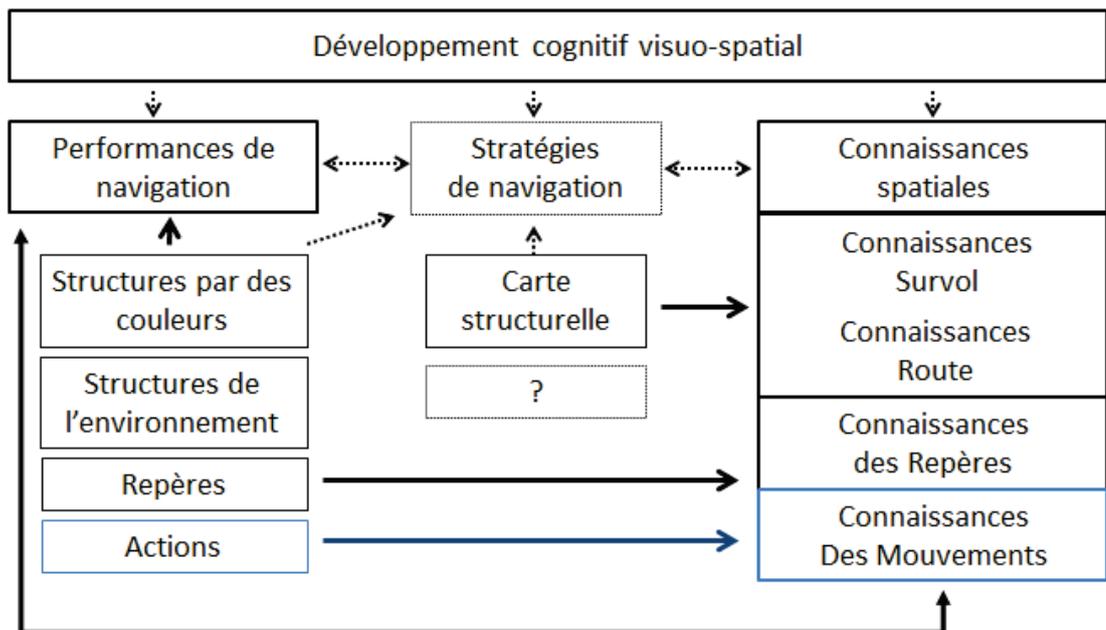


Figure 40 : Exemple d'adaptation du modèle de Jansen-Osmann (2007)

2. Les dimensions verbales et visuo-spatiales des représentations spatiales

2.1. Dans les restitutions

Dans les trois expériences, une restitution des connaissances des itinéraires a été réalisée sur des supports variés impliquant des connaissances verbales et visuo-spatiales. Des progressions sont observées en parallèle dans chacune des tâches, verbales ou non, certaines tâches semblant plus faciles que d'autres. Toutefois, la distinction concernerait plutôt le type de tâches et de connaissances que leur format. En effet, les tâches de production (description verbale et carte) sont moins bien réussies que les tâches de reconnaissance. De plus, les connaissances semblent évoluer différemment. D'une part, les connaissances concernant les repères semblent augmenter fortement et rapidement (étant « multipliées par deux » entre chaque tranche d'âge). D'une autre part, celles concernant la connaissance des directions semblent évoluer de façon plus progressive, par étapes ou paliers successifs. Ainsi, on observe des performances équivalentes en ce qui concerne les mentions de directions entre les enfants de six et de huit ans, puis celles-ci augmentent de façon importante (doublement des performances entre chaque tranche d'âge). Les performances du tracé des directions sur une carte ainsi que de la reconnaissance visuelle des directions (pour l'expérience 1 et l'expérience 3 en double tâche), quant à elles, augmentent significativement entre 6 et 8 ans, puis entre 10 ans et l'âge adulte. Les connaissances verbales et visuo-spatiales des repères semblent progresser de manière linéaire alors que les connaissances des directions apparaissent évoluer par paliers, que le format soit verbal ou visuo-spatial. Il y aurait donc deux rythmes de progression selon le type de connaissance de l'environnement ne dépendant pas de son format verbal ou visuo-spatial.

Pour les trois expériences, la tâche de reconnaissance visuelle des repères a montré une tendance à reconnaître comme vrai une entité visuellement différente du repère cible mais ayant la même dénomination, ainsi qu'une augmentation de cette tendance avec l'âge. En effet, alors que la reconnaissance des images repères et le rejet correct des images distractrices différentes augmentent avec l'âge, le rejet correct de distracteurs de même dénomination qu'un repère mais de caractéristiques visuelles différentes (distracteurs similaires ou reliés sémantiquement) diminue avec l'âge. Les distracteurs similaires sont donc de plus en plus considérés comme des repères. Les adultes (qui considèrent plus de 60 % des images similaires comme des repères qu'ils auraient vus) s'appuieraient donc en partie sur la dénomination des éléments, et pas uniquement sur leurs caractéristiques physiques. Ainsi, les repères seraient mémorisés sous un

format verbal bien qu'ils aient été perçus sous un format visuel. Ces résultats indiquent l'existence d'un double codage, ainsi qu'une préférence croissante pour le codage verbal avec l'âge. De même, certains auteurs considèrent que les jeunes enfants encodent les images d'objets dans leur forme visuelle puis qu'ils développeraient une approche phonologique pour mémoriser ces mêmes images vers l'âge de 8 ans (Pickering, 2010). Il pourrait s'agir soit de l'utilisation préférentielle d'une représentation verbale au détriment de la représentation visuelle, soit une représentation unique mixte, comprenant des informations verbales qui seraient privilégiées par les adultes. Ces derniers utiliseraient une stratégie de verbalisation des repères permettant plus facilement leur maintien en mémoire.

2.2. Différences inter-individuelles : Habiletés verbales et visuo-spatiales

Dans l'ensemble des groupes d'âge, des différences interindividuelles ont été observées. Celles-ci ont été étudiées en relation avec certaines habiletés cognitives et langagières. Tout d'abord, les individus possédant de fortes capacités d'attention mentionnent et reconnaissent plus facilement les repères et les directions que ceux dont ces capacités sont faibles. Nos résultats sont conformes aux études montrant le rôle de l'attention dans la navigation en réalité virtuelle (ex. Wilson & Péruch, 2002), ainsi que dans la capacité à sélectionner des informations pertinentes lors de la navigation (Heth et al., 1997).

Par ailleurs, la capacité à percevoir des directions est fortement liée à la qualité générale de la représentation spatiale de l'itinéraire. Elles sont liées aux connaissances des repères et des directions, pour des tâches de production et de reconnaissance, verbales et visuo-spatiales. Percevoir correctement des directions serait donc une capacité nécessaire pour l'acquisition des connaissances d'un itinéraire et donc de sa représentation mentale. Ainsi, nos résultats vont dans le sens d'un lien entre la capacité à percevoir des directions à petite échelle et à se représenter un itinéraire. Lors de la tâche de perception des directions, les participants devaient imaginer le trajet de flèches afin de déterminer si elles visaient ou non le centre d'une cible. Cette tâche ferait appel aux capacités de représentation et donc de manipulation mentale pouvant être mobilisées dans des épreuves de manipulation ou de vision survol comme c'était le cas dans notre étude. Une observation similaire avait été faite pour la capacité à percevoir des directions « à grande échelle » c'est-à-dire par des tâches de pointage (Neidhard & Popp, 2010). Cela pourrait donc impliquer l'utilisation d'un processus similaire pour les perceptions des directions à petite vs. grande échelle, qui entrerait en jeu dans la construction de représentations d'itinéraire.

Certaines capacités de mémoire de travail, notamment celles du calepin visuo-spatial, sont également corrélées à certaines performances de représentation d'itinéraires, notamment de reconnaissance des directions. Ce résultat confirme donc des observations réalisées chez l'enfant (ex. Fenner et al., 2000 ; Purser et al., 2012) et chez l'adulte (ex. Gras et al., 2013), mettant en avant le rôle de la mémoire de travail dans la navigation ou dans la représentation d'itinéraire. Par ailleurs, la capacité de la mémoire épisodique est également partiellement impliquée. Plus celle-ci est importante, plus la représentation alors créée est complète.

Conformément à l'étude de Fields et Shelton (2006) réalisée chez les adultes, les habiletés spatiales semblent donc bien à l'origine des différences interindividuelles dans les capacités à former des représentations spatiales. Ce lien entre les capacités visuo-spatiales et les capacités à se représenter un itinéraire dans un environnement virtuel apparaît également chez l'enfant dans nos études, qui étayaient l'hypothèse du rôle prépondérant des habiletés visuo-spatiales chez l'enfant (Fenner et al., 2000).

Par ailleurs, nous n'avons pas observé de corrélation entre les capacités verbales et les compétences de représentations spatiales dans les épreuves de l'itinéraire. Deux explications peuvent être avancées : soit nos tests manquent de sensibilité, soit l'interaction entre le langage et les compétences spatiales est faible ou absente. Concernant la première explication, des effets plafonds ont été observés dans une partie des épreuves, permettant de mesurer la connaissance des prépositions spatiales et des verbes de mouvement, mais pas toute la variabilité interindividuelle existant dans ces compétences langagières. Si nos mesures ont pu vérifier que les enfants maîtrisaient les éléments minimalement nécessaires pour décrire un itinéraire, d'autres méthodologies doivent être utilisées dans des recherches futures, notamment des tâches mesurant des capacités langagières plus complexes, afin d'examiner la seconde hypothèse selon laquelle le langage ne jouerait aucun rôle dans la cognition spatiale.

2.3. Rôle des composantes verbale et visuo-spatiale de la mémoire de travail lors de la mémorisation d'itinéraires

Des études ont mis en évidence un lien entre la mémoire de travail et la capacité à construire une représentation spatiale d'itinéraires chez l'enfant (ex Fenner et al., 2000 ; Purser et al., 2012). Toutefois ces études sont rares et à notre connaissance aucune n'a encore évalué le rôle de la mémoire de travail pendant la mémorisation d'itinéraires virtuels chez l'enfant. Dans la troisième expérience, le rôle des composantes verbales et spatiales de la mémoire de travail lors

de la mémorisation d'itinéraires a été étudié à l'aide du paradigme de double tâche. Nous avons observé des effets d'interférence de la tâche concurrente spatiale (répétition de mouvements) et de la tâche concurrente verbale (répétition des syllabes « babobi ») sur les descriptions verbales et les performances de reconnaissance verbale et visuo-spatiale, notamment chez l'enfant. Ces résultats suggèrent que ces deux composantes de la mémoire de travail jouent un rôle important dans la construction de représentations d'itinéraires chez l'enfant. Les effets d'interférence sont en effet principalement observés chez les enfants les plus jeunes (8 ans) de cette étude. Les deux doubles tâches provoquent toutefois une diminution du nombre de mentions des repères indiqués avec une relation spatio-temporelle dans tous les groupes d'âge. Pour les enfants, les doubles tâches interfèrent également avec les capacités de reconnaissance des repères présentés à l'aide d'images ou de mots. Enfin, un effet d'interférence, notamment spatial, est observé sur la reconnaissance des directions, qui sont liées à la connaissance de la route.

Ainsi, cette étude met en évidence que chez l'enfant, comme l'avait été observé chez l'adulte (ex. Garden et al., 2002), les deux composantes verbale et spatiale de la mémoire de travail sont impliquées dans la mémorisation du trajet. Toutefois, les enfants seraient plus sensibles aux interférences que les adultes. Deux hypothèses peuvent expliquer cette sensibilité plus importante de l'enfant aux interférences : (1) les enfants possèdent des capacités attentionnelles limitées ne permettant pas de prendre en charge deux tâches en même temps ; (2) les capacités exécutives, notamment de flexibilité, qui sont plus développées chez l'adulte, permettraient une meilleure gestion et réalisation des deux tâches.

Enfin, nous n'avons pas observé d'effets d'interférence différents selon les capacités individuelles de chacun. Ce résultat peut être dû à notre choix d'une analyse statistique non conservatrice réalisée sur des effets d'interférence assez faible. D'autres types d'analyses et un nombre plus important de participants pourraient permettre d'étudier les différences observées lors de ce type d'étude (par exemple, chez l'adulte, Gras et al., 2013 ; Wen et al., 2011).

3. Limites méthodologiques

3.1. L'utilisation de la réalité virtuelle

Pour les trois expériences présentées, nous avons utilisé des itinéraires virtuels en milieu urbain. L'utilisation de la réalité virtuelle constitue une approche ludique qui nous permet de placer l'ensemble des participants dans les mêmes conditions expérimentales ainsi que de manipuler les informations que nous souhaitons. Nous avons pu créer des itinéraires présentant le même nombre de croisements et de repères, ainsi que manipuler l'emplacement et donc le rôle des repères. De plus, cette méthode a été validée chez l'enfant et l'adulte pour l'étude de la représentation spatiale d'itinéraires (Jansen-Osmann, 2007). Toutefois, même si nos environnements se rapprochent d'environnements réels et permettent ainsi une approche écologique, certaines études montrent que la réalité virtuelle provoque une distorsion des connaissances des distances (ex. Plumert, Kearney, Cremer & Recker, 2005) pouvant être due aux possibilités motrices moindres mises en œuvre dans ces environnements. De ce fait, pour les études futures, le recours à la navigation réelle ou à la navigation virtuelle augmentée (notamment avec la possibilité de réaliser des mouvements physiques) pourrait permettre une meilleure immersion des participants et donc des résultats plus proches des situations réelles.

3.2. Un apprentissage passif

Dans l'ensemble de nos expériences de navigation spatiale, des itinéraires de villes virtuelles ont été présentés à l'aide de vidéos, mettant les participants en situation d'apprentissage passif. Ce choix est contestable du fait des différences observées dans la littérature entre les apprentissages passifs et actifs. Un apprentissage passif d'un environnement virtuel est souvent moins précis qu'un apprentissage actif (ex. Wallet et al., 2011 ; Chrastil & Warren, 2012). Bien que l'apprentissage des repères ne semble pas être affecté par le fait d'être passif (cette condition peut même permettre un meilleur apprentissage, Wilson & Péruch, 2002), les directions sont généralement moins bien indiquées après un apprentissage passif qu'après un apprentissage actif. Dans nos études, la connaissance des directions a donc sans doute été sous-estimée.

Toutefois, dans la vie quotidienne, les enfants suivent très souvent leurs aînés lors d'activités de navigation et sont donc dans une situation passive dans le sens où ils n'exercent aucune « prise de décision » (les deux dimensions, activité motrice et prise de décision sont en

effet à distinguer dans le caractère actif d'un apprentissage). Or, la prise de décision influence la sélection des informations perçues et permet un apprentissage volontaire. De plus, cet apprentissage passif nous permet de mieux contrôler la condition d'apprentissage et les informations présentées, puisque la durée de navigation c'est-à-dire d'exploration de l'environnement est identique. Afin de rendre les recherches futures plus écologiques, il pourrait être pertinent de mettre en place des navigations permettant à l'enfant de réaliser des mouvements moteurs lors de l'apprentissage de l'itinéraire mais sans prendre de décision. Cette situation expérimentale correspondrait ainsi à une situation couramment vécue par les enfants lorsqu'ils suivent quelqu'un, permettant de favoriser l'apprentissage des actions et d'observer des apprentissages de type « path integration ». Le suivi d'un avatar, par exemple, permettrait un tel suivi dynamique sans prise de décision.

3.3. Milieu urbain versus milieu rural

La majorité des participants adultes de notre étude étaient des étudiants vivant en région parisienne, familiers avec le milieu urbain, alors que l'ensemble des enfants venaient d'un milieu plutôt rural (écoles de villages et d'une petite ville de moins de 5 000 habitants). Les différences observées dans les performances des enfants et des adultes peuvent être biaisées par le milieu de vie des participants ; les facteurs âges et milieu de vie étant partiellement confondus. Le rôle de cet effet est d'autant plus à questionner que les itinéraires à mémoriser étaient situés dans un milieu virtuel urbain. L'importance de la familiarité ou non du milieu a été mise en évidence dans la connaissance d'un environnement (ex. Neidhardt & Popp, 2010). Les personnes vivant dans un milieu urbain sont habituées à la présence d'immeubles ou même d'un kiosque et bénéficient de cette familiarité lors de l'apprentissage. Dans la première étude, les mentions des repères dans les descriptions verbales ont en effet parfois posé des difficultés aux enfants. Par exemple, des éléments comme « le marchand ambulant de kebab » ont été baptisés de façon idiosyncratique (par exemple, « le marchand de galettes saucisses »). Ainsi, Il paraît pertinent d'envisager une étude avec des individus qui viennent d'un même milieu, c'est-à-dire qui sont tous familiers ou non de l'environnement.

3.4. Mémoire de travail : capacité de maintien ou de manipulation

Pour la troisième et dernière étude, nous nous sommes intéressés au rôle des composantes verbales et spatiales de la mémoire de travail lors de la mémorisation d'itinéraires.

Les tâches interférentes nécessitaient uniquement de répéter des syllabes ou un mouvement mais pas de réaliser un traitement cognitif sur ces informations. Or la mémoire de travail est caractérisée par cette capacité de manipulation des informations. Il serait également important d'étudier le rôle du buffer épisodique. En effet, nous avons émis l'hypothèse que la capacité à lier des informations entre elles (par exemple, des repères et leur position) était faible chez les enfants et que l'augmentation de cette capacité permettrait la construction d'une représentation globale de l'environnement. Le rôle des composantes verbale, visuelle, spatiale et du buffer épisodique de la mémoire de travail pourrait être étudié au cours de la mémorisation et de la restitution d'itinéraires afin de déterminer si les résultats précédemment observés chez l'adulte (ex. Brunyé & Taylor, 2008) seraient confirmés chez l'enfant. Par ailleurs, le rôle des composantes de la mémoire de travail est différent selon le type d'informations mémorisées et utilisées par l'adulte (ex. Deyzac et al., 2006), mais ce résultat n'a pas encore été observé chez l'enfant. Dans notre étude, les itinéraires étaient présentés et principalement restitués en vision route. La présentation de type route est en effet la plus souvent présente dans la vie quotidienne mais savoir se représenter la configuration d'un environnement dans son ensemble permettrait une navigation flexible et efficace même lors de changements. Ainsi, l'étude des connaissances en survol chez l'enfant serait intéressante. Des processus différents de ceux utilisés lors de la connaissance route ont été mis en évidence chez l'adulte (ex. Deyzac et al., 2006). Nous pourrions donc évaluer l'influence de la mémorisation en double tâche sur les connaissances de type route mais également sur les connaissances en survol chez l'enfant.

Nous avons pu observer des différences interindividuelles importantes aussi bien sur les connaissances des repères et des directions que sur les effets d'interférence des doubles tâches. Il serait donc intéressant d'approfondir l'étude de ces différences interindividuelles, notamment pour faire ressortir avec plus de précision l'existence ou non de profils cognitifs particuliers. L'étude des stratégies utilisées suivant les habiletés et le matériel serait donc une approche intéressante.

Chapitre 8 : Conclusion générale

Dans les expériences de cette thèse, nous avons étudié le développement des représentations d'itinéraires chez l'enfant et chez l'adulte. Une représentation d'un itinéraire est composée d'informations multiples concernant des repères, des actions et des directions. Ces informations peuvent être présentées aussi bien sous un format verbal que sous un format visuo-spatial. Le format verbal peut correspondre, par exemple, à une description verbale spatiale ou à un panneau de direction. Une information présentée visuellement peut correspondre à la perception directe d'un bâtiment (de son image visuelle) ou à une carte. L'une des questions de cette thèse concernait les processus impliqués dans le traitement de ces différents formats d'informations lorsque celles-ci sont perçues ou restituées. Le traitement d'informations verbales et visuo-spatiales lors de la mémorisation d'itinéraires mobilise des processus cognitifs variés impliquant notamment des habiletés verbales et visuo-spatiales. Une représentation spatiale d'un environnement peut impliquer plusieurs formats ou composantes. Le rôle et le développement conjoint des deux composantes, visuo-spatiale et verbale, sont au cœur de ce travail.

Au cours du développement, nous avons observé une augmentation qualitative et quantitative des informations verbales et visuo-spatiales concernant la connaissance de repères, d'actions ou de directions. Initialement, les enfants semblent acquérir une connaissance des éléments et des actions indépendamment les uns des autres. Leur développement est marqué par une augmentation des liens entre les différentes informations, notamment entre les repères et les actions, mais également entre l'image d'un repère et sa dénomination. Alors que le jeune enfant utiliserait uniquement ou principalement un format de codage visuo-spatial d'une information, les adultes utiliseraient les deux formats de codage, faisant ainsi intervenir leurs connaissances verbales et visuo-spatiales d'une même information afin de la traiter. Ce double codage leur permettrait un traitement de plus en plus complexe et de plus en plus efficace.

Par ailleurs, nous avons observé des différences interindividuelles dans chaque groupe d'âge étudié (enfants de 5 à 11 ans, adultes). Contrairement à nos hypothèses, seules les habiletés visuo-spatiales semblent être à l'origine de ces différences, mais le rôle des habiletés verbales n'a pas pu être mis en évidence.

La question du rôle que pourrait jouer le langage dans la cognition est actuellement débattue, notamment sa capacité de structurer partiellement la cognition spatiale. Si cette

question n'a pu être abordée de façon satisfaisante ici pour des raisons méthodologiques, l'un de nos résultats montre néanmoins que la reconnaissance visuelle des repères semble être influencée par les informations maintenues en mémoire sémantique, définissant partiellement l'identité de ces repères. Dans nos recherches, ce biais sémantique augmente avec l'âge et pourrait contribuer à mettre en évidence une influence croissante du langage sur la mémorisation des éléments qui constituent un itinéraire et/ou une utilisation croissante du codage verbal en plus d'une représentation visuo-spatiale. Néanmoins, la question ne peut être tranchée à priori à partir de nos seules données et cette hypothèse devra faire l'objet de recherches futures. En conclusion, les capacités de représentation spatiale sont marquées par une importante évolution développementale et une grande variabilité interindividuelle. Ces représentations intègrent à la fois des composantes verbales et visuo-spatiales, dont l'importance diffère selon le type de connaissances spatiale (repère-route-survol) plus que selon le format des tâches permettant de les tester (verbal versus visuo-spatial). L'implication de ces composantes semble donc complexe et ouvre de nombreuses perspectives pour des recherches futures.

Bibliographie

- Abrahams, S., Morris, R. G., Polkey, C. E., Jarosz, J. M., Cox, T. C. S., Graves, M., & Pickering, A. (1999). Hippocampal involvement in spatial and working memory: A structural MRI analysis of patients with unilateral mesial temporal lobe sclerosis. *Brain and Cognition*, *41*(1), 39–65. doi:10.1006/brcg.1999.1095
- Allen, G. L., Kirasic, K. C., & Beard, R. L. (1989). Children's expressions of spatial knowledge. *Journal of Experimental Child Psychology*, *48*(1), 114–130.
- Anderson, J.R. (1983). *The architecture of cognition*. Cambridge, MA :Harvard University Press.
- Anderson, J.R. (1993). *Rules of the mind*. Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Ang, S. Y., & Lee, K. (2010). Exploring developmental differences in visual short-term memory and working memory. *Developmental Psychology*, *46*(1), 279–285. <http://doi.org/10.1037/a0017554>
- Appleyard, D. (1969). Why buildings are known: A predictive tool for architects and planners. *Environment and Behavior*, *1*(2), 131–156. doi:10.1177/001391656900100202
- Ashraf, M. A. (2005). *La 3D interactive en temps réel comme aide à l'acquisition des connaissances spatiales: Etude de l'influence du mode d'exploration* (Mémoire). Ecole d'architecture, Université Laval, Québec.
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In *Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 2, pp. 89–195). Elsevier. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079742108604223>
- Aurnague, M., Vieu, L., & Borillo, A. (1997). Représentation formelle des concepts spatiaux dans la langue. Dans Denis M. *Langage et cognition spatiale* (pp. 69–102). Paris : Masson.
- Avraamides, M. N., Galati, A., Pazzaglia, F., Meneghetti, C., & Denis, M. (2013). Encoding and updating spatial information presented in narratives. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *66*(4), 642–670. doi:10.1080/17470218.2012.712147

- Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. Oxford: Oxford University Press.
- Baddeley, A. D. (1993). Working memory or working attention? In *Attention: Selection, awareness and control. A tribute to Donal Broadbent* (pp. 152–170). Oxford: Clarendon Press.
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 417–423. doi:10.1016/S1364-6613(00)01538-2
- Baddeley, A. D., Allen, R. J., & Hitch, G. J. (2011). Binding in visual working memory: The role of the episodic buffer. *Neuropsychologia*, 49(6), 1393–1400.
doi:10.1016/j.neuropsychologia.2010.12.042
- Baddeley, A., Eysenck, M., & Anderson, M. C. (2009). *Memory*. Hove: Psychology Press.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. In *Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 8, pp. 47–89). Elsevier. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079742108604521>
- Baddeley, A. D., & Logie, R. H. (1999). Working memory: The multiple-component model. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of Working Memory* (pp. 28–61). Cambridge: Cambridge University Press. Retrieved from <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9781139174909A012>
- Baddeley, A. D., Thomson, N., & Buchanan, M. (1975). Word length and the structure of short-term memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 14(6), 575–589. doi:10.1016/S0022-5371(75)80045-4
- Baillargeon, R. (1987). Object permanence in 3½- and 4½-month-old infants. *Developmental Psychology*, 23(5), 655–664. doi:10.1037//0012-1649.23.5.655
- Baillargeon, R. (2002). *The Acquisition of Physical Knowledge in Infancy: A Summary in Eight Lessons* (U.Goswami.). Oxford.
- Baillargeon, R., & DeVos, J. (1991). Object Permanence in Young Infants: Further Evidence. *Child Development*, 62(6), 1227–1246. doi:10.1111/j.1467-8624.1991.tb01602.x
- Baillargeon, R., Spelke, E. S., & Wasserman, S. (1985). Object permanence in five-month-old infants. *Cognition*, 20(3), 191–208. doi:10.1016/0010-0277(85)90008-3

- Baldwin, C. L., & Reagan, I. (2009). Individual differences in route-learning strategy and associated working memory resources. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *51*(3), 368–377. doi:10.1177/0018720809338187
- Banta Lavenex, P., Lecci, S., Prêtre, V., Brandner, C., Mazza, C., Pasquier, J., & Lavenex, P. (2011). As the world turns: Short-term human spatial memory in egocentric and allocentric coordinates. *Behavioural Brain Research*, *219*(1), 132–141. doi:10.1016/j.bbr.2010.12.035
- Bauer, P. J., Doydum, A. O., Pathman, T., Larkina, M., Güler, O. E., & Burch, M. (2012). It's all about location, location, location: Children's memory for the "where" of personally experienced events. *Journal of Experimental Child Psychology*, *113*(4), 510–522. doi:10.1016/j.jecp.2012.06.007
- Bauer, P. J., & Lukowski, A. F. (2010). The memory is in the details: Relations between memory for the specific features of events and long-term recall during infancy. *Journal of Experimental Child Psychology*, *107*(1), 1–14. doi:10.1016/j.jecp.2010.04.004
- Blades, M., & Spencer, C. (1990). The development of 3- to 6-year-olds' map using ability: the relative importance of landmarks and map alignment. *The Journal of Genetic Psychology*, *151*(2), 181–194. doi:10.1080/00221325.1990.9914653
- Borke, H. (1975). Piaget's mountains revisited: Changes in the egocentric landscape. *Developmental Psychology*, *11*(2), 240–243. doi:10.1037/h0076459
- Bowerman, M. (1996). The origins of children's spatial semantic categories: cognitive versus linguistic determinants. In *Rethinking linguistic relativity*, (Cambridge University Press.). Cambridge, UK: Gumperz, J.J. & Levinson S.C.
- Bowerman, M., & Choi, S. (2003). Space under construction: Language specific spatial categorization in first language acquisition. In *Language in Mind: Advances in the study of Language and Cognition* (MIT Press., pp. 387–427). Cambridge, MA: D. Gentner and S. Goldin-Meadow.
- Brandner, C. (2009). Spatial memory. In *Encyclopedia of Neuroscience* (Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg., pp. 3804–3806). M.D. Binder, N. Hirokawa, U. Windhorst.
- Broadbent, N. J., Squire, L. R., & Clark, R. E. (2004). Spatial memory, recognition memory, and the hippocampus. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *101*(40), 14515–14520. doi:10.1073/pnas.0406344101

- 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. doi:10.1016/j.cognition.2008.03.005
- Brunyé, T. T., & Taylor, H. A. (2008). Extended experience benefits spatial mental model development with route but not survey descriptions. *Acta Psychologica*, *127*(2), 340–354. doi:10.1016/j.actpsy.2007.07.002
- Brunyé, T. T., & Taylor, H. A. (2008). Working memory in developing and applying mental models from spatial descriptions. *Journal of Memory and Language*, *58*(3), 701–729. doi:10.1016/j.jml.2007.08.003
- Bryant, K. J. (1982). Personality correlates of sense of direction and geographic orientation. *Journal of Personality and Social Psychology*, *43*(6), 1318–1324. doi:10.1037//0022-3514.43.6.1318
- Buchner, A., & Jansen-Osmann, P. (2008). Is route learning more than serial learning? *Spatial Cognition & Computation*, *8*(4), 289–305. doi:10.1080/13875860802047201
- Bullens, J., Iglói, K., Berthoz, A., Postma, A., & Rondi-Reig, L. (2010b). Developmental time course of the acquisition of sequential egocentric and allocentric navigation strategies. *Journal of Experimental Child Psychology*, *107*(3), 337–350. doi:10.1016/j.jecp.2010.05.010
- Bullens, J., Nardini, M., Doeller, C. F., Braddick, O., Postma, A., & Burgess, N. (2010a). The role of landmarks and boundaries in the development of spatial memory: Landmarks and boundaries in children. *Developmental Science*, *13*(1), 170–180. doi:10.1111/j.1467-7687.2009.00870.x
- Burgess, N. (2006). Spatial memory: how egocentric and allocentric combine. *Trends in Cognitive Sciences*, *10*(12), 551–557. doi:10.1016/j.tics.2006.10.005
- Burgess, N., Maguire, E. A., & O’Keefe, J. (2002). The human hippocampus and spatial and episodic memory. *Neuron*, *35*(4), 625–641. doi:10.1016/S0896-6273(02)00830-9
- Burgess, N., Spiers, H., & Paleologou, E. (2004). Orientational manoeuvres in the dark: dissociating allocentric and egocentric influences on spatial memory. *Cognition*, *94*(2), 149–166. doi:10.1016/j.cognition.2004.01.001
- Camos, V., & Barrouillet, P. (2014). Le développement de la mémoire de travail : perspectives dans le cadre du modèle de partage temporel des ressources. *Psychologie Française*, *59*(1), 21–39. doi:10.1016/j.psfr.2012.12.003

- Campbell, N. A., & Reece, J. B. (2011). *Campbell Biology*. San Francisco, Calif: Benjamin Cummings.
- Carlson-Radvansky, L. A., & Irwin, D. E. (1993). Frames of reference in vision and language: Where is above? *Cognition*, *46*(3), 223–244. doi:10.1016/0010-0277(93)90011-J
- Carlson, L. A., & Van Deman, S. R. (2004). The space in spatial language. *Journal of Memory and Language*, *51*(3), 418–436. doi:10.1016/j.jml.2004.06.004
- Casasola, M., & Park, Y. (2013). Developmental Changes in Infant Spatial Categorization: When More Is Best and When Less Is Enough. *Child Development*, *84*(3), 1004–1019. doi:10.1111/cdev.12010
- Case, R., Kurland, D. M., & Goldberg, J. (1982). Operational efficiency and the growth of short-term memory span. *Journal of Experimental Child Psychology*, *33*(3), 386–404. doi:10.1016/0022-0965(82)90054-6
- Choi, S., & Bowerman, M. (1991). Learning to express motion events in English and Korean: The influence of language-specific lexicalization patterns. *Cognition*, *41*(1-3), 83–121. doi:10.1016/0010-0277(91)90033-Zz
- Chrastil, E. R., & Warren, W. H. (2012). Active and passive contributions to spatial learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, *19*(1), 1–23. doi:10.3758/s13423-011-0182-x
- Clifton, K. R. (2001). Ce que les bébés nous ont appris : un parcours de recherche. *Enfance*, *53*(1), 5. <http://doi.org/10.3917/enf.531.0005>
- Cohen, R., & Schuepfer, T. (1980). The representation of landmarks and routes. *Child Development*, *51*(4), 1065–1071. doi:10.2307/1129545
- Coluccia, E., Bosco, A., & Brandimonte, M. A. (2007). The role of visuo-spatial working memory in map learning: new findings from a map drawing paradigm. *Psychological Research*, *71*(3), 359–372. doi:10.1007/s00426-006-0090-2
- Cornell, E. H., Heth, C. D., & Alberts, D. M. (1994). Place recognition and way finding by children and adults. *Memory & Cognition*, *22*(6), 633–643. doi:10.3758/BF03209249

- Cornell, E. H., Heth, C. D., & Broda, L. S. (1989). Children's wayfinding: Response to instructions to use environmental landmarks. *Developmental Psychology*, 25(5), 755–764. doi:10.1037/0012-1649.25.5.755
- Cornell, E. H., Heth, C. D., & Rowat, W. L. (1992). Wayfinding by children and adults: Response to instructions to use look-back and retrace strategies. *Developmental Psychology*, 28(2), 328–336. doi:10.1037/0012-1649.28.2.328
- Cousins, J. H., Siegel, A. W., & Maxwell, S. E. (1983). Way finding and cognitive mapping in large-scale environments: A test of a developmental model. *Journal of Experimental Child Psychology*, 35(1), 1–20. doi:10.1016/0022-0965(83)90066-8
- Cowan, N. (1988). Evolving conceptions of memory storage, selective attention, and their mutual constraints within the human information-processing system. *Psychological Bulletin*, 104(2), 163–191. doi:10.1037//0033-2909.104.2.163
- Cowan, N. (2005). *Working memory capacity*. Hove, East Sussex; Hillsdale, UK: Psychology Press.
- Cowan, N. (2010a). The magical mystery four: How is working memory capacity limited, and why? *Current Directions in Psychological Science*, 19(1), 51–57. doi:10.1177/0963721409359277
- Cowan, N. (2010b). Multiple concurrent thoughts: The meaning and developmental neuropsychology of working memory. *Developmental Neuropsychology*, 35(5), 447–474. doi:10.1080/87565641.2010.494985
- Cowan, N. (2012). Short-term and working memory in childhood. In *the whiley-Blackwell handbook of children's memory*. Bauer & Fivush.
- Cowan, N., Morey, C. C., AuBuchon, A. M., Zwillling, C. E., & Gilchrist, A. L. (2010). Seven-year-olds allocate attention like adults unless working memory is overloaded: Capacity and attention allocation. *Developmental Science*, 13(1), 120–133. doi:10.1111/j.1467-7687.2009.00864.x
- Cowan, N., Nugent, L. D., Elliott, E. M., & Sauls, J. S. (2000). Persistence of memory for ignored lists of digits: Areas of developmental constancy and change. *Journal of Experimental Child Psychology*, 76(2), 151–172. doi:10.1006/jecp.1999.2546
- Daniel, M.-P., & Denis, M. (2004). The production of route directions: investigating conditions that favour conciseness in spatial discourse. *Applied Cognitive Psychology*, 18(1), 57–75. doi:10.1002/acp.941

- Daniel, M.-P., Tom, A., Manghi, E., & Denis, M. (2003). Testing the Value of Route Directions Through Navigational Performance. *Spatial Cognition & Computation*, 3(4), 269–289. doi:10.1207/s15427633scc0304_2
- Denis, M. (1996). Imagery and the description of spatial configurations. In *Models of visuospatial cognition* (Oxford University Press., pp. 128–197). New York: De Vega, M., Intons-Peterson M.J., Johnson-Laird P.N, Denis M. & Marschark M.
- Denis, M. (1997). The description of routes: A cognitive approach to the production of spatial discourse. *Current Psychology of Cognition*, 16, 409–458.
- Denis, M. (2008). Assessing the symbolic distance effect in mental images constructed from verbal descriptions: A study of individual differences in the mental comparison of distances. *Acta Psychologica*, 127(1), 197–210. doi:10.1016/j.actpsy.2007.05.006
- Denis, M. (2012). *La psychologie cognitive*. Paris: Éd. de la Maison des sciences de l'homme.
- Denis, M., & Cocude, M. (1992). Structural properties of visual images constructed from poorly or well-structured verbal descriptions. *Memory & Cognition*, 20(5), 497–506. doi:10.3758/BF03199582
- Denis, M., Goncalves, M.-R., & Memmi, D. (1995). Mental scanning of visual images generated from verbal descriptions: Towards a model of image accuracy. *Neuropsychologia*, 33(11), 1511–1530. doi:10.1016/0028-3932(95)00078-H
- Denis, M., & Kosslyn, S. M. (1999). Scanning visual mental images: A window on the mind. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 18(2), 409–465.
- 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. doi:10.1002/(SICI)1099-0720(199904)13:2<145::AID-ACP550>3.0.CO;2-4
- De Renzi, E., & Nichelli, P. (1975). Verbal and non-verbal short-term memory impairment Following Hemispheric Damage. *Cortex*, 11(4), 341–354. doi:10.1016/S0010-9452(75)80026-8
- Deyzac, E., Logie, R. H., & Denis, M. (2006). Visuospatial working memory and the processing of spatial descriptions. *British Journal of Psychology*, 97(2), 217–243. doi:10.1348/000712605X67484

- Dixon, P. (1987). The structure of mental plans for following directions. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *13*(1), 18–26.
- Ebbinghaus, H. (1885). *Über das gedächtnis: untersuchungen zur experimentellen psychologie*. Leipzig: Duncker & Humblot.
- Ehrich, V. (1982). Discourse organization and sentence form in child language: how children describe rooms. *Papers and Reports on Child Language Development*, *21*, 55–62.
- Ehrich, V., & Koster, C. (1983). Discourse organization and sentence form: The structure of room descriptions in Dutch. *Discourse Processes*, *6*, 169–195.
- Engle, R. W. (2002). Working memory capacity as executive attention. *Current Directions in Psychological Science*, *11*(1), 19–23. doi:10.1111/1467-8721.00160
- Ericsson, K., Chase, W., & Faloon, S. (1980). Acquisition of a memory skill. *Science*, *208*(4448), 1181–1182. doi:10.1126/science.7375930
- Farran, E. K., Blades, M., Boucher, J., & Tranter, L. J. (2010). How do individuals with Williams syndrome learn a route in a real-world environment? *Developmental Science*, *13*(3), 454–468. doi:10.1111/j.1467-7687.2009.00894.x
- Farran, E. K., Courbois, Y., Van Herwegen, J., & Blades, M. (2012). How useful are landmarks when learning a route in a virtual environment? Evidence from typical development and Williams syndrome. *Journal of Experimental Child Psychology*, *111*(4), 571–586. doi:10.1016/j.jecp.2011.10.009
- Fenner, J., Heathcote, D., & Jerrams-Smith, J. (2000). The development of wayfinding competency: Asymmetrical effects of visuo-spatial and verbal ability. *Journal of Environmental Psychology*, *20*(2), 165–175. doi:10.1006/jev.1999.0162
- Fields, A. W., & Shelton, A. L. (2006). Individual skill differences and large-scale environmental learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *32*(3), 506–515. doi:10.1037/0278-7393.32.3.506
- Gaillard, V., Barrouillet, P., Jarrold, C., & Camos, V. (2011). Developmental differences in working memory: Where do they come from? *Journal of Experimental Child Psychology*, *110*(3), 469–479. doi:10.1016/j.jecp.2011.05.004

- Gallina, J.-M., & Lautrey, J. (2000). Evolution de la représentation mentale d'un itinéraire décrit verbalement chez des enfants de 5 à 11 ans. *Enfance*, 53(4), 351–374.
- Ganel, T., Tanzer, M., & Goodale, M. A. (2008). A double dissociation between action and perception in the context of visual illusions: Opposite effects of real and illusory size. *Psychological Science*, 19(3), 221–225. doi:10.1111/j.1467-9280.2008.02071.x
- Garden, S., Cornoldi, C., & Logie, R. H. (2002). Visuo-spatial working memory in navigation. *Applied Cognitive Psychology*, 16(1), 35–50. doi:10.1002/acp.746
- Garnham, A., & Oakhill, J. (1993). Modèles mentaux et compréhension du langage. In *Les modèles mentaux: approches cognitive des représentations* (Masson., pp. 23–46). Paris: Ehrlich M.F., Tardieu H., Cavazza M.
- Gathercole, S. E. (1994). Neuropsychology and working memory: A review. *Neuropsychology*, 8(4), 494–505. doi:10.1037/0894-4105.8.4.494
- Gathercole, S. E. (1999). Cognitive approaches to the development of short-term memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 3(11), 410–419. doi:10.1016/S1364-6613(99)01388-1
- Gathercole, S. E., & Pickering, S. J. (2000). Assessment of working memory in six- and seven-year-old children. *Journal of Educational Psychology*, 92(2), 377–390. doi:10.1037//0022-0663.92.2.377
- Gennari, S., Sloman, S. A., Malt, B. C., & Fitch, W. T. (2002). Motion events in language and cognition. *Cognition*, 83(1), 49–79. [http://doi.org/10.1016/S0010-0277\(01\)00166-4](http://doi.org/10.1016/S0010-0277(01)00166-4)
- Gilchrist, A. L., Cowan, N., & Naveh-Benjamin, M. (2009). Investigating the childhood development of working memory using sentences: New evidence for the growth of chunk capacity. *Journal of Experimental Child Psychology*, 104(2), 252–265. doi:10.1016/j.jecp.2009.05.006
- Golledge, R. G. (1987). Environmental cognition. Handbook of environmental psychology. Retrieved from http://www.edra.org/sites/default/files/publications/EDRA04-Golledge-182-185_1.pdf
- Golledge, R. G. (1990). The conceptual and empirical basis of a general theory of spatial knowledge. In *Spatial choices and processes* (Elsevier., pp. 147–168). Amsterdam: Fischer MM, Nijkamp P, Papageorgiou YY.

- Golledge, R. G. (2004). Spatial cognition. In Spielberger. *Encyclopedia of Applied Psychology* (pp. 443–452). Amsterdam: Elsevier.
- Golledge, R. G., & Hubert, L. J. (1982). Some comments on non-Euclidean mental maps. *Environment and Planning A*, *14*(1), 107–118. doi:10.1068/a140107
- Golledge, R. G., Smith, T. R., Pellegrino, J. W., Doherty, S., & Marshall, S. P. (1985). A conceptual model and empirical analysis of children's acquisition of spatial knowledge. *Journal of Environmental Psychology*, *5*(2), 125–152. doi:10.1016/S0272-4944(85)80014-1
- Grabowski, J., & Weiss, P. (1996). The prepositional inventory of languages: A factor that affects comprehension of spatial prepositions. *Language Sciences*, *18*(1-2), 19–35. doi:10.1016/0388-0001(96)00005-8
- Gras, D., Gyselinck, V., Pérussel, M., Orriols, E., & Piolino, P. (2013). The role of working memory components and visuospatial abilities in route learning within a virtual environment. *Journal of Cognitive Psychology*, *25*(1), 38–50. doi:10.1080/20445911.2012.739154
- Gyselinck, V. (2009). *La mémoire de/au travail: compréhension et évolution*. (Thèse HDR, Université Paris Descartes : France).
- 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. doi:10.1007/s00426-006-0091-1
- Gyselinck, V., & Meneghetti, C. (2011). The role of spatial working memory in understanding verbal descriptions. In *Spatial working memory* (Psychology Press., pp. 159–180). A. Van Dierendonck & A. Szmalec.
- 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. doi:10.1016/j.lindif.2008.08.002
- Haden, C. A., Ornstein, P. A., O'Brien, B. S., Elischberger, H. B., Tyler, C. S., & Burchinal, M. J. (2011). The development of children's early memory skills. *Journal of Experimental Child Psychology*, *108*(1), 44–60. doi:10.1016/j.jecp.2010.06.007

- 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. doi:10.1038/nature03721
- Hayward, W. G., & Tarr, M. J. (1995). Spatial language and spatial representation. *Cognition*, *55*(1), 39–84. doi:10.1016/0010-0277(94)00643-Y
- Hazen, N. L., Lockman, J. J., & Pick, H. L. (1978). The development of children's representations of large-scale environments. *Child Development*, *49*(3), 623. doi:10.2307/1128229
- Hemmer, I., Hemmer, M., Kruschel, K., Neidhardt, E., Obermaier, G., & Uphues, R. (2013). Which children can find a way through a strange town using a streetmap? – results of an empirical study on children's orientation competence. *International Research in Geographical and Environmental Education*, *22*(1), 23–40. doi:10.1080/10382046.2012.759436
- Herman, J. F. (1980). Children's cognitive maps of large-scale spaces: Effects of exploration, direction, and repeated experience. *Journal of Experimental Child Psychology*, *29*(1), 126–143. doi:10.1016/0022-0965(80)90096-X
- Hermer-Vazquez, L., Moffet, A., & Munkholm, P. (2001). Language, space, and the development of cognitive flexibility in humans: the case of two spatial memory tasks. *Cognition*, *79*(3), 263–299. doi:10.1016/S0010-0277(00)00120-7
- Heth, C. D., Cornell, E. H., & Alberts, D. M. (1997). Differential use of landmarks by 8- and 12-year-old children during route reversal navigation. *Journal of Environmental Psychology*, *17*, 199–213. doi:10.1006/jevp.1997.0057
- Hickmann, M. (1998). Form, function, and context in narrative development. *Journal of Pragmatics*, *29*(1), 33–56. doi:10.1016/S0378-2166(97)00039-8
- Hickmann, M. (2000). Le développement de l'organisation discursive. In *L'acquisition du langage. Le langage en développement. Au-delà de 3 ans* (Presses Universitaires de France , pp. 83–115). Paris: Kail, M. & Fayol, M.
- Hickmann, M. (2003). *Children's discourse : Person, space and time across languages*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Hickmann, M. (2006). The relativity of motion in first language acquisition. In M. Hickmann & S. Robert (Eds.), *Typological Studies in Language* (Vol. 66, pp. 281–308). Amsterdam: John Benjamins Publishing Company. Retrieved from <https://benjamins.com/catalog/tsl.66.17hic>
- Hickmann, M. (2007). Motion and location in French: a developmental and crosslinguistic perspective. In *The categorization of spatial entities in language and cognition* (pp. 205–231). Amsterdam: Benjamins: Aurnague, M., Hickmann, M. & Vieu, L.
- Hickmann, M., & Hendriks, H. (2006). Static and dynamic location in French and in English. *First Language*, 26(1), 103–135. doi:10.1177/0142723706060743
- Hickmann, M., Hendriks, H., & Champaud, C. (2008). Typological constraints on motion in French and English child language. In J. Guo, E. Lieven, S. Ervin-Tripp, N. Budwig, K. Nakamura, & Ş. Özçalışkan (Eds.), *Crosslinguistic approaches to the psychology of language: Research in the tradition of Dan Isaac Slobin* (209–224). New York: Psychology Press.
- Hickmann, M., Hendriks, H., Roland, F., & Liang, J. (1996). The marking of new information in children's narratives: a comparison of English, French, German and Mandarin Chinese*. *Journal of Child Language*, 23(03), 591–619. doi:10.1017/S0305000900008965
- Hickmann, M., Hendriks, H., & Roland, F. (1998). Référence spatiale dans les récits d'enfants français : perspective inter-langues. *Langue Française*, 118(1), 104–123.
- Hickmann, M., Kail, M., & Roland, F. (1995). L'organisation référentielle dans les récits d'enfants en fonction des contraintes contextuelles. *Enfance* 2, 215-226.
- Hickmann, M., Lewi-Dumont, N., Derrier, S., Galiano, A. R., Nys, M., & Vérine, B. (2013). Spatial language in blind children: learning to express location and motion without vision. Presented at the Fifth International Conference, Association de Linguistique Cognitive 5AFLICO V), Lille, France.
- Hickmann, M., Taranne, P., & Bonnet, P. (2009). Motion in first language acquisition: Manner and Path in French and English child language*. *Journal of Child Language*, 36(04), 705. doi:10.1017/S0305000908009215
- Hirtle, S. C., & Hudson, J. (1991). Acquisition of spatial knowledge for routes. *Journal of Environmental Psychology*, 11(4), 335–345. doi:10.1016/S0272-4944(05)80106-9

- Hölscher, C., Büchner, S. J., Meilinger, T., & Strube, G. (2009). Adaptivity of wayfinding strategies in a multi-building ensemble: The effects of spatial structure, task requirements, and metric information. *Journal of Environmental Psychology, 29*(2), 208–219. doi:10.1016/j.jenvp.2008.05.010
- Hölscher, C., Tenbrink, T., & Wiener, J. M. (2011). Would you follow your own route description? Cognitive strategies in urban route planning. *Cognition, 121*(2), 228–247. doi:10.1016/j.cognition.2011.06.005
- Hulme, C., & Tordoff, V. (1989). Working memory development: The effects of speech rate, word length, and acoustic similarity on serial recall. *Journal of Experimental Child Psychology, 47*(1), 72–87. doi:10.1016/0022-0965(89)90063-5
- Hund, A. M., & Nazarczuk, S. N. (2009). The effects of sense of direction and training experience on wayfinding efficiency. *Journal of Environmental Psychology, 29*(1), 151–159. doi:10.1016/j.jenvp.2008.05.009
- Hund, A. M., & Padgitt, A. J. (2010). Direction giving and following in the service of wayfinding in a complex indoor environment. *Journal of Environmental Psychology, 30*(4), 553–564. doi:10.1016/j.jenvp.2010.01.002
- Hund, A. M., & Plumert, J. M. (2003). Does information about what things are influence children's memory for where Things Are? *Developmental Psychology, 39*(6), 939–948. doi:10.1037/0012-1649.39.6.939
- Hund, A. M., Schmettow, M., & Noordzij, M. L. (2012). The impact of culture and recipient perspective on direction giving in the service of wayfinding. *Journal of Environmental Psychology, 32*(4), 327–336. doi:10.1016/j.jenvp.2012.05.007
- Huttenlocher, J., Vasilyeva, M., Newcombe, N., & Duffy, S. (2008). Developing symbolic capacity one step at a time. *Cognition, 106*(1), 1–12. doi:10.1016/j.cognition.2006.12.006
- James, W. (1890). *The principles of psychology*. NY, US: Henry Holt and Company. Retrieved from <http://content.apa.org/books/11059-000>
- Jansen-Osmann, P. (2007). Use of virtual environments to investigate development of spatial behavior and spatial knowledge of school-age children. *Psychological Reports, 100*(2), 675–690. doi:10.2466/pr0.100.2.675-690

- Jansen-Osmann, P., & Fuchs, P. (2006). Wayfinding behavior and spatial knowledge of adults and children in a virtual environment: The role of landmarks. *Experimental Psychology*, 53(3), 171–181. doi:10.1027/1618-3169.53.3.171
- Jansen-Osmann, P., Schmid, J., & Heil, M. (2007). Wayfinding behavior and spatial knowledge of adults and children in a virtual environment: The role of the environmental structure. *Swiss Journal of Psychology*, 66(1), 41–50. doi:10.1024/1421-0185.66.1.41
- Jansen-Osmann, P., & Wiedenbauer, G. (2004a). The representation of landmarks and routes in children and adults: A study in a virtual environment. *Journal of Environmental Psychology*, 24(3), 347–357. doi:10.1016/j.jenvp.2004.08.003
- Jansen-Osmann, P., & Wiedenbauer, G. (2004b). Distance cognition in virtual environmental space: Further investigations to clarify the route-angularity effect. *Psychological Research Psychologische Forschung*, 70(1), 43–51. doi:10.1007/s00426-004-0183-8
- Johnston, J. R. (1985). Cognitive prerequisites: The evidence from children learning English. In *The crosslinguistic study of language acquisition* (Lawrence Erlbaum Associates, Vol. 2, pp. 961–1004). Hillsdale NJ, Erlbaum: Slobin.
- Johnston, J. R. (1988). Children's verbal representation of spatial location. In *Spatial Cognition* (pp. 195–205). Hillsdale NJ, Erlbaum: Stiles Davis J., Kritchewsky, M. & Bellugi U.
- Johnston, J. R., & Slobin, D. I. (1979). The development of locative expressions in English, Italian, Serbo-Croatian and Turkish. *Journal of Child Language*, 6(03).
doi:10.1017/S030500090000252X
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models: Towards a cognitive science of language, inference and consciousness*. Cambridge: Harvard University Press.
- Johnson-Laird, P. N. (2004). The history of mental models. In *Psychology and reasoning: theoretical and historical perspectives* (Psychology Press.). New York: Manktelow K. & Chung M.C.
- Juhel, J. (1991). Spatial abilities and individual differences in visual information processing. *Intelligence*, 15(1), 117–137. doi:10.1016/0160-2896(91)90025-9

- Kail, M., & Hickmann, M. (1992). French children's ability to introduce referents in narratives as a function of mutual knowledge. *First Language*, 12(34), 73–94. doi:10.1177/014272379201203405
- Kato, Y., & Takeuchi, Y. (2003). Individual differences in wayfinding strategies. *Journal of Environmental Psychology*, 23(2), 171–188. doi:10.1016/S0272-4944(03)00011-2
- Kelly, J. W., & McNamara, T. P. (2010). Reference frames during the acquisition and development of spatial memories. *Cognition*, 116(3), 409–420. doi:10.1016/j.cognition.2010.06.002
- Kessels, R. P. C., de Haan, E. H. F., Kappelle, L. J., & Postma, A. (2001). Varieties of human spatial memory: a meta-analysis on the effects of hippocampal lesions. *Brain Research Reviews*, 35(3), 295–303. doi:10.1016/S0165-0173(01)00058-3
- Khomsî, A. (2003). *Evaluation du langage oral (ELO)* (Editions du Centre de Psychologie Appliquée.). Paris.
- Korkman, M., Kirk, U., & Kemp, S. (2003). *Batterie Neuropsychologiques pour enfant (NEPSY)* (Editions du Centre de Psychologie Appliquée.). Paris.
- Kozlowski, L. T., & Bryant, K. J. (1977). Sense of direction, spatial orientation, and cognitive maps. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 3(4), 590–598. doi:10.1037//0096-1523.3.4.590
- Kumaran, D., Hassabis, D., Spiers, H. J., Vann, S. D., Vargha-Khadem, F., & Maguire, E. A. (2007). Impaired spatial and non-spatial configural learning in patients with hippocampal pathology. *Neuropsychologia*, 45(12), 2699–2711. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2007.04.007
- Landau, B. (1986). Early map use as an unlearned ability. *Cognition*, 22(3), 201–223. doi:10.1016/0010-0277(86)90015-6
- Landau, B. (1994). Where's what and what's where: The language of objects in space. *Lingua*, 92, 259–296. doi:10.1016/0024-3841(94)90344-1
- Landau, B. (2002). Spatial Cognition. In *Encyclopedia of the Human Brain* (pp. 395–418). Elsevier. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B0122272102003265>
- Lécuyer, R. (2001). Rien n'est jamais acquis: Ou de la permanence de l'objet... de polémiques. *Enfance*, 53(1), 35. <http://doi.org/10.3917/enf.531.0035>

- Lehning, M., Leplow, B., Friege, L., Herzog, A., Ferstl, R., & Mehdorn, M. (1998). Development of spatial memory and spatial orientation in preschoolers and primary school children. *British Journal of Psychology (London, England: 1953)*, *89* (Pt 3), 463–480.
- Levelt, W. J. M. (1989). *Speaking: From intention to articulation*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Levinson, S. C., Kita, S., Haun, D. B. ., & Rasch, B. H. (2002). Returning the tables: language affects spatial reasoning. *Cognition*, *84*(2), 155–188. doi:10.1016/S0010-0277(02)00045-8
- Lloyd, P. (1991). Strategies used to communicate route directions by telephone: a comparison of the performance of 7-year-olds, 10-year-olds and adults. *Journal of Child Language*, *18*(01), 171. doi:10.1017/S0305000900013349
- Logie, R. H. (1995). *Visuo-spatial working memory*. Hove, East Sussex; Hillsdale [N.J.]: L. Erlbaum Associates.
- Logie, R. H., & Marchetti, C. (1991). Chapter 7 Visuo-spatial working memory: Visual, spatial or central executive? In *Advances in Psychology* (Vol. 80, pp. 105–115). Elsevier. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0166411508605075>
- Lynch, K. (1960). *The Image of the City*. Cambridge, MA: MIT press.
- MacWhinney, B. (2000). *The CHILDES Project: Tools for Analyzing Talk*. 3rd Edition.
- Maguire, E. A., Burgess, N., Donnett, J. G., Frackowiak, R. S. J., Frith, C. ., & O’Keefe, J. (1998). Knowing where and getting there: A human navigation network. *Science*, *280*(5365), 921–924. doi:10.1126/science.280.5365.921
- Maguire, E. A., Burgess, N., & O’Keefe, J. (1999). Human spatial navigation: cognitive maps, sexual dimorphism, and neural substrates. *Current Opinion in Neurobiology*, *9*(2), 171–177. doi:10.1016/S0959-4388(99)80023-3
- Maguire, E. A., Burke, T., Phillips, J., & Staunton, H. (1996). Topographical disorientation following unilateral temporal lobe lesions in humans. *Neuropsychologia*, *34*(10), 993–1001. doi:10.1016/0028-3932(96)00022-X
- Maguire, E. A., Gadian, D. G., Johnsrude, I. S., Good, C. D., Ashburner, J., Frackowiak, R. S. J., & Frith, C. D. (2000). Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers.

Proceedings of the National Academy of Sciences, 97(8), 4398–4403.
doi:10.1073/pnas.070039597

- Maguire, E. A., Nannery, R., & Spiers, H. J. (2006b). Navigation around London by a taxi driver with bilateral hippocampal lesions. *Brain*, 129(11), 2894–2907. doi:10.1093/brain/awl286
- Maguire, E. A., Spiers, H. J., Good, C. D., Hartley, T., Frackowiak, R. S. J., & Burgess, N. (2003). Navigation expertise and the human hippocampus: a structural brain imaging analysis. *Hippocampus*, 13(2), 250–259. doi:10.1002/hipo.10087
- Maguire, E. A., Woollett, K., & Spiers, H. J. (2006a). London taxi drivers and bus drivers: A structural MRI and neuropsychological analysis. *Hippocampus*, 16(12), 1091–1101. doi:10.1002/hipo.20233
- Majid, A., Bowerman, M., Kita, S., Haun, D. B. M., & Levinson, S. C. (2004). Can language restructure cognition? The case for space. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(3), 108–114. doi:10.1016/j.tics.2004.01.003
- Meilinger, T., Knauff, M., & Bulthoff, H. (2008). Working Memory in Wayfinding—A Dual Task Experiment in a Virtual City. *Cognitive Science: A Multidisciplinary Journal*, 32(4), 755–770. doi:10.1080/03640210802067004
- Meneghetti, C., De Beni, R., Gyselinck, V., & Pazzaglia, F. (2011b). Working memory involvement in spatial text processing: what advantages are gained from extended learning and visuo-spatial strategies? *British Journal of Psychology (London, England: 1953)*, 102(3), 499–518. doi:10.1111/j.2044-8295.2010.02007.x
- Meneghetti, C., De Beni, R., Gyselinck, V., & Pazzaglia, F. (2013). The joint role of spatial ability and imagery strategy in sustaining the learning of spatial descriptions under spatial interference. *Learning and Individual Differences*, 24, 32–41. doi:10.1016/j.lindif.2012.12.021
- Meneghetti, C., De Beni, R., Pazzaglia, F., & Gyselinck, V. (2011a). The role of visuo-spatial abilities in recall of spatial descriptions: A mediation model. *Learning and Individual Differences*, 21(6), 719–723. doi:10.1016/j.lindif.2011.07.015
- Meneghetti, C., Fiore, F., Borella, E., & De Beni, R. (2011c). Learning a map of environment: The role of visuo-spatial abilities in young and older adults. *Applied Cognitive Psychology*, 25(6), 952–959. doi:10.1002/acp.1788

- Meneghetti, C., Gyselinck, V., Pazzaglia, F., & De Beni, R. (2009). Individual differences in spatial text processing: High spatial ability can compensate for spatial working memory interference. *Learning and Individual Differences, 19*(4), 577–589. doi:10.1016/j.lindif.2009.07.007
- Michon, P.-E., & Denis, M. (2001). When and why are visual landmarks used in giving directions? In D. R. Montello (Ed.), *Spatial Information Theory* (Vol. 2205, pp. 292–305). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from http://link.springer.com/10.1007/3-540-45424-1_20
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review, 63*(2), 81–97. doi:10.1037/h0043158
- Miller, G. A. (1994). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review, 101*(2), 343–352. doi:10.1037//0033-295X.101.2.343
- Miller, J., & Carlson, L. (2011). Selecting landmarks in novel environments. *Psychonomic Bulletin & Review, 18*(1), 184–191. <http://doi.org/10.3758/s13423-010-0038-9>
- Miller, G. A., Galanter, E., & Pribram, K. H. (1960). *Plans and the structure of behavior*. New York: Henry Holt and Company.
- Milner, B. (1966). Amnesia following operation on the temporal lobes. In *Amnesia* (Amnesia., pp. 109–133). London, Butterworth: C.W.M. Whitty & O.L. Zangwill.
- Morris, R. (1984). Developments of a water-maze procedure for studying spatial learning in the rat. *Journal of Neuroscience Methods, 11*(1), 47–60. doi:10.1016/0165-0270(84)90007-4
- Munnich, E., Landau, B., & Doshier, B. A. (2001). Spatial language and spatial representation: a cross-linguistic comparison. *Cognition, 81*(3), 171–208. doi:10.1016/S0010-0277(01)00127-5
- Nardini, M., Burgess, N., Breckenridge, K., & Atkinson, J. (2006). Differential developmental trajectories for egocentric, environmental and intrinsic frames of reference in spatial memory. *Cognition, 101*(1), 153–172. doi:10.1016/j.cognition.2005.09.005
- Neidhardt, E., & Popp, M. (2010). Spatial Tests, Familiarity with the Surroundings, and Spatial Activity Experience. *Journal of Individual Differences, 31*(2), 59–63. doi:10.1027/1614-0001/a000010

- Newcombe, N.S., Uttal, D.H. & Sauter, M. (2013). Spatial development. In P. Zelazo (Ed.), Oxford handbook of developmental psychology, Vol. 1: Body and mind (pp. 564-590). New York: Oxford University Press.
- Nicolas, S. (2013). *Histoire de la psychologie (nouvelle édition)*. Paris: Dunod.
- Oakes, L. M., Hurley, K. B., Ross-Sheehy, S., & Luck, S. J. (2011). Developmental changes in infants' visual short-term memory for location. *Cognition*, *118*(3), 293–305. doi:10.1016/j.cognition.2010.11.007
- 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. doi:10.1016/0006-8993(71)90358-1
- O'Keefe, J., & Nadel, L. (1979). The cognitive map as a hippocampus. *Behavioral and Brain Sciences*, *2*(04), 520–533. doi:10.1017/S0140525X00064256
- Olton, D. S. (1979). Mazes, maps, and memory. *American Psychologist*, *34*(7), 583–596. doi:10.1037/0003-066X.34.7.583
- Padgitt, A. J., & Hund, A. M. (2012). How good are these directions? Determining direction quality and wayfinding efficiency. *Journal of Environmental Psychology*, *32*(2), 164–172. doi:10.1016/j.jenvp.2012.01.007
- Paivio, A. (1971). *Imagery and verbal processes*. New York: Holt, Rinehart and Winston.
- Paivio, A. (1986). *Mental representations: A dual coding approach*. New York: Oxford University Press.
- Paivio, A. (2014). Intelligence, dual coding theory, and the brain. *Intelligence*, *47*, 141–158. doi:10.1016/j.intell.2014.09.002
- Pallaud, B. (2001). Communication animale et langage humain. *Primatologie*, *4*, 113–133.
- Papafragou, A., Hulbert, J., & Trueswell, J. (2008). Does language guide event perception? Evidence from eye movements. *Cognition*, *108*(1), 155–184. doi:10.1016/j.cognition.2008.02.007

- Papafragou, A., Li, P., Choi, Y., & Han, C. (2007). Evidentiality in language and cognition. *Cognition*, *103*(2), 253–299. doi:10.1016/j.cognition.2006.04.001
- Papafragou, A., Massey, C., & Gleitman, L. (2002). Shake, rattle, “n” roll: the representation of motion in language and cognition. *Cognition*, *2*(84), 189–219.
- Papafragou, A., & Selimis, S. (2010). Event categorisation and language: A cross-linguistic study of motion. *Language and Cognitive Processes*, *25*(2), 224–260. doi:10.1080/01690960903017000
- Pazzaglia, F., De Beni, R., & Meneghetti, C. (2006). The effects of verbal and spatial interference in the encoding and retrieval of spatial and nonspatial texts. *Psychological Research*, *71*(4), 484–494. doi:10.1007/s00426-006-0045-7
- Pazzaglia, F., Gyselinck, V., Cornoldi, C., & De Beni, R. (2012). Individual differences in spatial text processing. In *From Mental Imagery to Spatial Cognition and Language. In honor of Michel Denis* (pp. 127–161). In V. Gyselinck & F. Pazzaglia.
- Pazzaglia, F., Meneghetti, C., De Beni, R., & Gyselinck, V. (2010). Working memory components in survey and route spatial text processing. *Cognitive Processing*, *11*(4), 359–369. doi:10.1007/s10339-009-0353-0
- Pennequin, V., Nanty, I., & Khomsi, A. (2004). Mesurer la résistance à l’interférence chez l’enfant : élaboration d’un nouveau test à « effet Stroop ». *L’année psychologique*, *104*(2), 203–226. doi:10.3406/psy.2004.29664
- Peter, M., Glück, J., & Beiglböck, W. (2010). Map understanding as a developmental marker in childhood. *Journal of Individual Differences*, *31*(2), 64–71. doi:10.1027/1614-0001/a000011
- Piaget, J. (1937). *La construction du réel chez l’enfant*. Paris: Delachaux et Niestlé.
- Piaget, J. (1972). *La transmission des mouvements*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Piaget, J. (1975). *L’équilibration des structures cognitives : problème central du développement*. Paris : Presses Universitaires de France.

- Piaget, J. (1977). *La naissance de l'intelligence chez l'enfant (9ème édition)*. Paris : Delachaux et Nieslé.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1948) *The Child's conception of space*. New York: Norton.
- Picard, L., Cousin, S., Guillery-Girard, B., Eustache, F., & Piolino, P. (2012). How do the different components of episodic memory develop? Role of executive functions and short-term feature-binding abilities: How Does Episodic Memory Develop? *Child Development*, 83(3), 1037–1050. doi:10.1111/j.1467-8624.2012.01736.x
- Piccardi, L., Leonzi, M., D'Amico, S., Marano, A., & Guariglia, C. (2014). Development of navigational working memory: Evidence from 6- to 10-year-old children. *British Journal of Developmental Psychology*, 32(2), 205–217. doi:10.1111/bjdp.12036
- Picucci, L., Gyselinck, V., Piolino, P., Nicolas, S., & Bosco, A. (2013). Spatial mental models: The interaction of presentation format, task requirements and availability of working memory components: Visual and verbal routes. *Applied Cognitive Psychology*, 27(3), 314–327. doi:10.1002/acp.2909
- Pickering, S. J. (2001). The development of visuo-spatial working memory. *Memory*, 9(4-6), 423–432. doi:10.1080/09658210143000182
- Piérart, B. (1976). Les relations spatiales d'intériorité et d'entourage dans le langage des enfants de trois à huit ans. *International Journal of Early Childhood*, 8(1), 10–16. doi:10.1007/BF03176846
- Piérart, B. (1977). L'acquisition du sens des marqueurs de relation spatiale « devant » et « derrière ». *L'année Psychologique*, 77(1), 95–116. doi:10.3406/psy.1977.28181
- Piérart, B. (1978). Acquisition du langage, patron sémantique et développement cognitif — observations à propos des prépositions spatiales au-dessous de, au-dessus de, sous et sur. *Enfance*, 197–208.
- Piérart, B. (1998). Genèse et structuration des marqueurs de relations spatiales. *L'année Psychologique*, 98(4), 953–638.
- Pine, D. S., Grun, J., Maguire, E. A., Burgess, N., Zarahn, E., Koda, V., ... Bilder, R. M. (2002). Neurodevelopmental aspects of spatial navigation: A virtual reality fMRI study. *NeuroImage*, 15(2), 396–406. doi:10.1006/nimg.2001.0988

- 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. doi:10.1145/1077399.1077402
- 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. doi:10.1051/jbio/2010009
- Presson, C. C. (1987). The development of landmarks in spatial memory: The role of differential experience. *Journal of Experimental Child Psychology*, 44(3), 317–334. doi:10.1016/0022-0965(87)90037-3
- Presson, C. C., & Montello, D. R. (1988). Points of reference in spatial cognition: Stalking the elusive landmark. *British Journal of Developmental Psychology*, 6(4), 378–381. doi:10.1111/j.2044-835X.1988.tb01113.x
- Prestopnik, J. L., & Roskos-Ewoldsen, B. (2000). The relations among wayfinding strategy use, sense of direction, sex, familiarity, and wayfinding ability. *Journal of Environmental Psychology*, 20(2), 177–191. doi:10.1006/jevps.1999.0160
- Pross, N., Gaonac'h, D., & Gaux, C. (2008). Développement de la mémoire de travail : relations du centre exécutif avec la boucle phonologique et le calepin visuospatial chez des enfants de CE1 et de CM2. *Psychologie Française*, 53(3), 307–326. doi:10.1016/j.psfr.2008.04.004
- Purser, H. R. M., Farran, E. K., Courbois, Y., Lemahieu, A., Mellier, D., Sockeel, P., & Blades, M. (2012). Short-term memory, executive control, and children's route learning. *Journal of Experimental Child Psychology*, 113(2), 273–285. doi:10.1016/j.jecp.2012.06.005
- Quaiser-Pohl, C., Lehmann, W., & Eid, M. (2004). The relationship between spatial abilities and representations of large-scale space in children—a structural equation modeling analysis. *Personality and Individual Differences*, 36(1), 95–107. doi:10.1016/S0191-8869(03)00071-0
- Quinn, P. C. (2002). Category Representation in Young Infants. *Current Directions in Psychological Science*, 11(2), 66–70. doi:10.1111/1467-8721.00170
- Quinn, J. G., & McConnell, J. (1996). Irrelevant Pictures in Visual Working Memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A*, 49(1), 200–215. doi:10.1080/027249896392865

- Ranck, J. B. J. (1985). Head direction cells in the deep cell layer of dorsal presubiculum in freely moving rats. In *Electrical activity of the archicortex* (pp. 217–220). Budapest: Buzsaki G., Vanderwolf C.H.
- Ratliff, K. R., & Newcombe, N. S. (2008). Is language necessary for human spatial reorientation? Reconsidering evidence from dual task paradigms. *Cognitive Psychology*, *56*(2), 142–163. doi:10.1016/j.cogpsych.2007.06.002
- Recker, K. M., Plumert, J. M., Hund, A. M., & Reimer, R. (2007). How do biases in spatial memory change as children and adults are learning locations? *Journal of Experimental Child Psychology*, *98*(4), 217–232. doi:10.1016/j.jecp.2007.05.005
- Ribordy, F., Jabès, A., Banta Lavenex, P., & Lavenex, P. (2013). Development of allocentric spatial memory abilities in children from 18 months to 5 years of age. *Cognitive Psychology*, *66*(1), 1–29. doi:10.1016/j.cogpsych.2012.08.001
- Richmond, J. L., Zhao, J. L., & Burns, M. A. (2015). What goes where? Eye tracking reveals spatial relational memory during infancy. *Journal of Experimental Child Psychology*, *130*, 79–91. doi:10.1016/j.jecp.2014.09.013
- Riggs, K. J., McTaggart, J., Simpson, A., & Freeman, R. P. J. (2006). Changes in the capacity of visual working memory in 5- to 10-year-olds. *Journal of Experimental Child Psychology*, *95*(1), 18–26. doi:10.1016/j.jecp.2006.03.009
- Robin, F. (2002). Production et coordination des termes spatiaux entre 6 et 9 ans. *Enfance*, *54*(4), 363. doi:10.3917/enf.544.0363
- Sandamas, G., & Foreman, N. (2007). Spatial reconstruction following virtual exploration in children aged 5–9 years: Effects of age, gender and activity–passivity. *Journal of Environmental Psychology*, *27*(2), 126–134. doi:10.1016/j.jenvp.2007.03.001
- Schneider, P., Dubé, R. V., & Hayward, D. (2005.). *The Edmonton Narrative Norms Instrument*. Alberta, Canada.
- Shallice, T., & Warrington, E. K. (1970). Independent functioning of verbal memory stores: A neuropsychological study. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *22*(2), 261–273. doi:10.1080/00335557043000203

- Sholl, J. M., Acacio, J. C., Makar, R. O., & Leon, C. (2000). The relation of sex and sense of direction to spatial orientation in an unfamiliar environment. *Journal of Environmental Psychology, 20*(1), 17–28. doi:10.1006/jevp.1999.0146
- Shusterman, A., Ah Lee, S., & Spelke, E. S. (2011). Cognitive effects of language on human navigation. *Cognition, 120*(2), 186–201. doi:10.1016/j.cognition.2011.04.004
- Siegel, A. W., & White, S. H. (1975). The development of spatial representations of large-scale environments. In *Advances in Child Development and Behavior* (Vol. 10, pp. 9–55). Elsevier. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0065240708600075>
- Siegler, R. (2000.). *Enfant et raisonnement. Le développement cognitif de l'enfant*. De Boeck Université. Bruxelles.
- Slobin, D. I. (1996). From “thought and language” to “thinking for speaking” (J. J. Gumperz & S. C. Levinson., pp. 70–96). Cambridge: Cambridge University Press.
- Slobin, D. I. (2004). How People move: Discourse effects of linguistic typology. In *Discourse across languages and cultures* (Amsterdam & Philadelphia: John Benjamins., pp. 195–210). C. L. Moder, & A. Martinovic-Zic.
- Slobin, D. I. (2006). What makes manner of motion salient? Explorations in linguistic typology, discourse, and cognition. In *Space in languages: Linguistic systems and cognitive categories*, (pp. 59–81). Amsterdam/Philadelphia: John Benjamins: Hickmann, M. & Robert, S.
- Soroli, E., Hickmann, M., & Sahraoui, H. (2011). Encoding and decoding motion events in english and french: Comparative case-studies in agrammatism and anomia. *Procedia - Social and Behavioral Sciences, 23*, 49–50. <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.09.164>
- Spelke, E. S. (1998). Nativism, empiricism, and the origins of knowledge. *Infant Behavior and Development, 21*(2), 181–200. doi:10.1016/S0163-6383(98)90002-9
- Spelke, E. S. (2000). Core knowledge. *American Psychologist, 55*(11), 1233–1243. doi:10.1037/0003-066X.55.11.1233

- Spiers, H. J., Burgess, N., Hartley, T., Vargha-Khadem, F., & O'Keefe, J. (2001). Bilateral hippocampal pathology impairs topographical and episodic memory but not visual pattern matching. *Hippocampus*, *11*(6), 715–725. doi:10.1002/hipo.1087
- Talmy, L. (2000). *Toward a cognitive semantics* (Vols. 1-2). Cambridge: MA: MIT press.
- Tam, H., Jarrold, C., Baddeley, A. D., & Sabatos-DeVito, M. (2010). The development of memory maintenance: Children's use of phonological rehearsal and attentional refreshment in working memory tasks. *Journal of Experimental Child Psychology*, *107*(3), 306–324. doi:10.1016/j.jecp.2010.05.006
- Taylor, H. A., & Tversky, B. (1992). Spatial mental models derived from survey and route descriptions. *Journal of Memory and Language*, *31*(2), 261–292. doi:10.1016/0749-596X(92)90014-O
- Thorndyke, P. W., & Hayes-Roth, B. (1982). Differences in spatial knowledge acquired from maps and navigation. *Cognitive Psychology*, *14*(4), 560–589. doi:10.1016/0010-0285(82)90019-6
- Tolman, E. C. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review*, *55*(4), 189–208. doi:10.1037/h0061626
- Tom, A., & Denis, M. (2003). Referring to landmark or street information in route directions: What difference does it make? In W. Kuhn, M. F. Worboys, & S. Timpf (Eds.), *Spatial Information Theory. Foundations of Geographic Information Science* (Vol. 2825, pp. 362–374). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-39923-0_24
- Tom, A., & Denis, M. (2004). Language and spatial cognition: comparing the roles of landmarks and street names in route instructions. *Applied Cognitive Psychology*, *18*(9), 1213–1230. doi:10.1002/acp.1045
- Towse, J. N., & Hitch, G. J. (1995). Is there a relationship between task demand and storage space in tests of working memory capacity? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *48*(1), 108–124. doi:10.1080/14640749508401379
- Towse, J. N., Hitch, G. J., & Hutton, U. (1998). A reevaluation of working memory capacity in children. *Journal of Memory and Language*, *39*(2), 195–217. doi:10.1006/jmla.1998.2574

- Tulving, E. (1995). Organization of memory: Quo vadis? In *The Cognitive Neurosciences* (MIT Press., pp. 839–847). Cambridge, MA: Gazzaniga MS.
- Vallar, G., & Baddeley, A. D. (1984). Fractionation of working memory: Neuropsychological evidence for a phonological short-term store. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 23(2), 151–161. doi:10.1016/S0022-5371(84)90104-X
- Vandenberg, S. G., & Kuse, A. R. (1978). Mental rotations, a group test of three-dimensional spatial visualization. *Perceptual and Motor Skills*, 47(2), 599–604. doi:10.2466/pms.1978.47.2.599
- Van Geert, P. (1998). A dynamic systems model of basic developmental mechanisms: Piaget, Vygotsky, and beyond. *Psychological Review*, 105(4), 634–677. doi:10.1037/0033-295X.105.4.634-677
- Vasilyeva, M., & Lourenco, S. F. (2012). Development of spatial cognition. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 3(3), 349–362. doi:10.1002/wcs.1171
- Verjat, I. (1994). Confrontation de deux approches de la localisation spatiale. *L'année psychologique*, 94(3), 403–423. doi:10.3406/psy.1994.28774
- Waller, G. (1986). The development of route knowledge: Multiple dimensions? *Journal of Environmental Psychology*, 6(2), 109–119. doi:10.1016/S0272-4944(86)80012-3
- Wallet, G., Sauz on, H., Pala, P. A., Larrue, F., Zheng, X., & N’Kaoua, B. (2011). Virtual/real transfer of spatial knowledge: Benefit from visual fidelity provided in a virtual environment and impact of active navigation. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 14(7-8), 417–423. doi:10.1089/cyber.2009.0187
- Waugh, N. C., & Norman, D. A. (1965). Primary memory. *Psychological Review*, 72(2), 89–104. doi:10.1037/h0021797
- Wechsler, D. (2001). *Echelle clinique de mémoire. 3 me  dition (MEM III)*. Editions du Centre de Psychologie Appliquée. Paris.
- Weissenborn, J. (1986). Learning how to become an interlocutor the verbal negotiation of common frames of reference and actions in dyads of 7-14 year old children. In *Theoretical issues in*

language acquisition: continuity and change in development (pp. 269–299). Cook- Gumperz, J. Corsaro, W. & Streeck, J.

- Wen, W., Ishikawa, T., & Sato, T. (2011). Working memory in spatial knowledge acquisition: Differences in encoding processes and sense of direction. *Applied Cognitive Psychology*, 25(4), 654–662. doi:10.1002/acp.1737
- Wen, W., Ishikawa, T., & Sato, T. (2013). Individual differences in the encoding processes of egocentric and allocentric survey knowledge. *Cognitive Science*, 37(1), 176–192. doi:10.1111/cogs.12005
- Wen, W., Ishikawa, T., & Sato, T. (2014). Instruction of verbal and spatial strategies for the learning about large-scale spaces. *Learning and Individual Differences*, 35, 15–21. doi:10.1016/j.lindif.2014.06.005
- 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*, 21(16), 601–633.
- Woollett, K., & Maguire, E. A. (2010). The effect of navigational expertise on wayfinding in new environments. *Journal of Environmental Psychology*, 30(4), 565–573. doi:10.1016/j.jenvp.2010.03.003
- Woollett, K., & Maguire, E. A. (2011). Acquiring “the Knowledge” of London’s Layout Drives Structural Brain Changes. *Current Biology*, 21(24), 2109–2114. doi:10.1016/j.cub.2011.11.018
- Wynn, K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, 358(1992), 749–750. doi:10.1038/358749a0

Annexes

1. Livret de passation (livret expérimentateur)

1.1. Questionnaire introductif

Nom de l'agent :

N°:

Grade :

Date de naissance :

Sexe :

Dis-moi ou montre-moi, la main que tu utilises pour dessiner, écrire ...:

T'arrive-t-il de te promener seul (sans tes parents) ? pour aller au sport ou rentrer à la maison par exemple:

- Jamais
- Une/deux fois par an
- Une/deux fois par mois
- Une/deux fois par semaine
- Plus de trois fois par semaine

T'arrive-t-il d'utiliser un ordinateur ou des jeux vidéo ?

- Jamais
- Une/deux fois par mois
- Une/deux fois par semaine
- Plus de trois fois par semaine

Nombres d'heures par semaine:.....

En quelle langue parlent tes parents, à la maison ?

Autre (Lunettes, Autre langues/séjours prolongés, troubles locomoteurs...):

1.2. Histoire introductive : Histoire de Mr X

Monsieur X est recherché par la police. Il prépare un mauvais coup et il va bientôt sortir. Tu ne pourras pas voir Monsieur X, mais tu pourras suivre le chemin qu'il va prendre. Il faudra bien faire attention à tous les endroits où il va aller. Après il faudra faire un rapport pour la police : tu devras raconter ce qu'il a fait et par où il est passé.

1.3. Consignes de mémorisation des itinéraires, étude 1

Consigne (encodage de la vidéo d'entraînement):

Avant toute chose, je vais te montrer un exemple de ville qui ressemble à la ville de Monsieur X. Après la vidéo, tu devras expliquer le chemin parcouru, le dessiner sur une carte et faire quelques jeux sur l'ordinateur.

Consigne (encodage de la vidéo test):

Monsieur X va bientôt sortir... Je te rappelle que tu ne pourras pas le voir, mais que tu dois être très attentif/ve au trajet qu'il va emprunter.

Tu vas voir ce trajet deux fois pour bien te rappeler de tous les endroits où il est allé. Tu as bien compris ? Prêt(e) ?

1.4. Description verbale

Consigne (Description verbale):

Maintenant que tu as visité cette ville. Peux-tu raconter le chemin parcouru avec le plus de détails possibles pour que quelqu'un qui ne connaît pas la ville puisse refaire le chemin sans se tromper et sans demander de l'aide à quelqu'un ?

Relances :

Si l'enfant n'arrive pas à commencer :

Comment cela commence ? Qu'est-ce que tu as vu au début ? Au début, ...

Ferme les yeux et repenses à la vidéo ; qu'est-ce que tu vois ? De quoi te souviens-tu ?

Si l'enfant n'est pas précis :

Souviens-toi, quelqu'un doit pouvoir refaire le parcours. Soit le plus précis possible. /

Tu peux recommencer avec plus de détails ?

Si l'enfant ne donne pas du tout d'éléments particuliers :

Y a-t-il des éléments particuliers/ détails que tu pourrais rajouter qui pourraient aider quelqu'un à refaire le chemin ?

Si l'enfant veut que l'expérimentateur lui donne la réponse :

Que penses-tu ? ... c'est ton rapport, tu dois décider

Si l'enfant bloque sur un aspect :

Ne t'inquiète pas à ce sujet, raconte-moi le reste du trajet. Racontes-moi tout ce dont tu te souviens.

1.5. Cartographie

Consigne (entraînement) :

Voici une carte de la ville. Il y a plein de rues, pour les voitures ou les piétons. Peux-tu tracer, avec ce stylo, sur cette carte le chemin parcouru ? Voici le départ.



Peux-tu indiquer tous les repères dont tu te souviens ?

Où est leur place ?

Consigne (test) :

Voici une carte de la ville. Ici, il y a la mairie, ici il y a une boulangerie, ici il y a une grande tour bleue. Il y a plein de routes possibles, il y en a pour les voitures et d'autre pour les piétons. Peux-tu tracer, avec ce stylo, sur cette carte le chemin que Monsieur X a parcouru ? Voici l'endroit d'où est parti Mr X.



Peux-tu indiquer tous les repères dont tu te souviens ?

Où est leur place ?

1.6. Reconnaissance visuelle des repères

Consigne :

Tu vas voir des images de la ville et entendre leur nom. Seulement certaines images sont sur le chemin. Fait bien attention, il y a des images qui ressemblent à ce que tu as vu mais qui sont différentes.

Lorsque l'image fait partie du chemin, appuie sur la touche VERTE. Si ce n'est pas exactement l'image qui était sur le chemin, appuie sur la touche ROUGE.

Comme c'est un entraînement, il y a une correction. Si tu as des questions tu peux les poser à n'importe quel moment.

Appuis sur une touche lorsque tu es prêt(e).

1.7. Test des affirmations (« Le rapport »)

Consigne :

Un ancien policier a fait un rapport mais il a fait de nombreuses erreurs. Peux-tu aider la police à les retrouver ? Tu vas entendre ce que le policier a écrit et tu dois me dire si c'est vrai ou faux.

Tu vas entendre les phrases.

Après chaque phrase, appuie sur le bouton VERT si c'est Vrai, sur le bouton ROUGE si c'est Faux et sur le point d'interrogation si tu ne sais pas.

Ecoute bien toute la phrase avant de répondre

La phrase sera répétée jusqu'à ta réponse.

1.7.1. Choix des directions

Consigne :

Tu vas voir des images où des routes se croisent. Avec les flèches du clavier, indique la rue qu'il faut prendre lorsque tu es à chaque carrefour.

Utilise les flèches du clavier pour indiquer la direction à prendre.

Il y a 3 flèches, appuie ici s'il faut aller tout droit, ici s'il faut prendre cette rue ou là s'il faut prendre celle-là.

Répond le plus rapidement possible. Si tu es prêt(e), appuie sur une touche

1.8. Reconnaissance du trajet sur une carte

Consigne (entraînement) : Voici la carte de la ville avec plusieurs chemins. Peux-tu indiquer à la police le chemin que tu as pris ?

1/



2/



3/



4/



Consigne (test) : Voici la carte de la ville avec plusieurs chemins. Peux-tu indiquer à la police le chemin que Mr X a pris ?



2. Matériel de réalité virtuelle

2.1. Exemple d'images d'éléments neutres de la ville

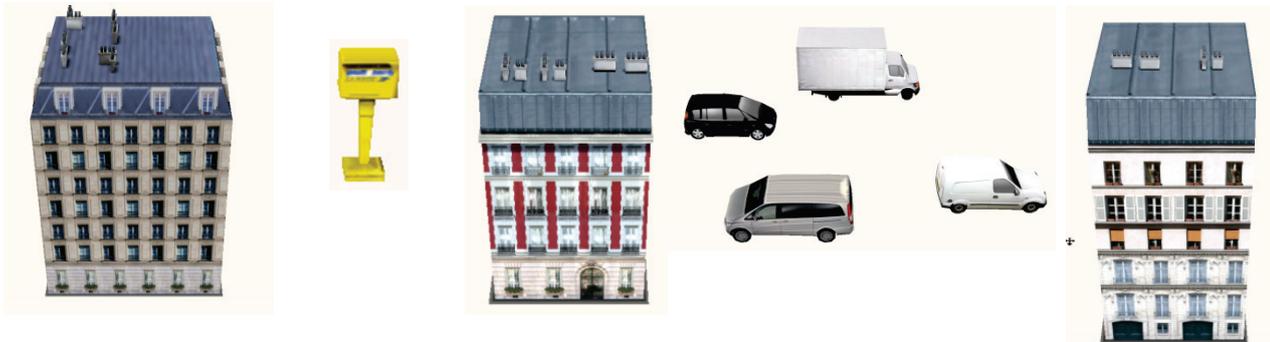
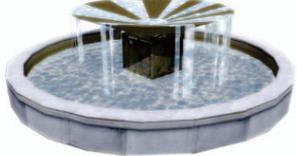


Figure A : Exemples d'éléments non spécifiques de la ville : Immeubles d'habitations, boîte à lettres et véhicules

2.2. Images des repères et des distracteurs visuels de la ville test

Tableau A : Paire des images repères-cibles / distracteurs similaires, distracteurs différents

Repères cibles et leur distracteur similaire			
Cible	Distracteur similaire	Cible	Distracteur similaire
Marchand de légumes (1)		Abris bus (2)	
			
Bâtiment gris (3)		Fontaine (4)	
			
Gare (5)		Restaurant (6)	
			

Kebab/ marchand de sandwishes (7)		Kiosque/marchant de journaux (8)	
			
Mairie (9)		Tour bleue (10)	
			
Parking souterrain (11)		Poste (12)	
			
Statue (13)		Bar/Tabac Chez Philippe (14)	
			
Distracteurs différents			
Boulangerie	Librairie	Théâtre	Cabine téléphonique
			

Tableau B : Contrebalancement des items présentés dans le test de reconnaissance des repères, (étude 1)

Liste des items visuels cibles et similaires présentés au cours des tests de reconnaissance, leur ordre de présentation est aléatoire (plan par sujet : $S \langle V_4 \rangle$)

	7 Cibles							4 Similaires			
Version 1	1	3	4	5	6	7	12	2	9	11	13
Version 2	1	3	4	5	6	7	12	8	9	10	14
Version 3	8	9	10	11	13	14	2	1	3	5	6
Version 4	8	9	10	11	13	14	2	4	5	7	12

2.3. Items de vérification de phrases : Version A et B

Tableau C : Items de vérification de phrases : Version A et B

Version A

Affirmations	Verbe	Repère	Préposition	Réponse
Le départ était à droite de la route.	Statique	départ	droite	V
Un marchand de légumes se trouvait à droite de la route.	Statique	légumes	droite	F
Il y avait un parc au bout de la route.	Statique	parc	au bout	V
Il y avait un restaurant à droite de Mr X.	Statique	restaurant	droite	F
Monsieur X est passé entre le parking sous- terrain et le restaurant.	Dynamique	parking sous terrain	entre	V
Mr X est passé juste devant les statues	Dynamique	statues	devant	F
Mr X est passé derrière un arrêt de bus.	Dynamique	bus	derrière	V
La mairie était à gauche de la route.	Statique	mairie	gauche	F
Il y avait une boulangerie u bout de la route.	Statique	boulangerie	au bout	F
Il y avait un bureau de poste à gauche de Mr X.	Statique	poste	gauche	V
Mr X a traversé devant le bureau de poste.	Dynamique	poste	devant	V
Mr X est passé entre la poste et la librairie.	Dynamique	poste & librairie	entre	F
Mr X est passé derrière le bureau de tabac.	Dynamique	tabac	derrière	F
Mr X est passé devant un marchand de sandwich.	Dynamique	kebab	devant	V
Mr X est passé derrière un marchand de journaux.	Dynamique	kiosque	derrière	F
Mr X est passé entre le parc et un parking.	Dynamique	parc & parking	entre	F
Le parking était à gauche de Mr X.	Statique	parking	gauche	V
Il y avait une place au bout de la route.	Statique	place	au bout	V

Version B

Affirmations	Verbe	Repère	Préposition	Réponse
Le départ était à gauche de la route.	Statique	départ	gauche	F
Un marchand de légumes se trouvait à gauche de la route.	Statique	légumes	gauche	V
Il y avait une boulangerie au bout de la route.	Statique	boulangerie	au bout	F
Monsieur X a traversé devant le parking sous-terrain.	Dynamique	parking sous terrain	devant	V
Monsieur X est passé entre le parking sous- terrain et le marchand de légumes.	Dynamique	parking & légumes	entre	F
Il y avait un bâtiment avec des statues au bout de la route.	Statique	statue	au bout	V
Mr X est passé derrière les statues	Dynamique	statues	derrière	F
Mr X est passé devant un arrêt de bus.	Dynamique	bus	devant	F
Il y avait un parc à gauche de Mr X.	Statique	parc	gauche	F
La mairie était à droite de Mr X.	Statique	mairie	droite	V
Il y avait un supermarché au bout de la route.	Statique	supermarché	au bout	V
Il y avait un bureau de poste à droite de Mr X.	Statique	poste	droite	F
Mr X a traversé devant le bureau de tabac.	Dynamique	tabac	devant	F
Mr X est passé entre la poste et le tabac.	Dynamique	poste & tabac	entre	V
Mr X est passé derrière un marchand de sandwich.	Dynamique	kebab	derrière	F
Mr X est passé devant un marchand de journaux.	Dynamique	kiosque	devant	V
Mr X est passé entre la gare et un parking.	Dynamique	gare & parking	entre	V
Le parking était à droite de Mr X.	Statique	parking	droite	F

3. Tests complémentaires expérience 1

3.1. Test de barrage (NEPSY, Korkman et al., 2003)

La capacité d'**attention sélective** est mesurée par le test de barrage de la NEPSY (Korkman et al., 2003). Ce test est composé de deux feuilles A3 avec sur la première feuille, 96 images représentant des jouets qui sont présentées de façon désordonnées (non alignées) et sur la deuxième feuille, 96 visages présentés alignés (présentation ordonnée).

Les participants réalisent le barrage des chats et des deux visages : ils doivent barrer le plus rapidement possible un ou deux éléments prédéterminés (un chat ou deux visages différents, un garçon et une fille). Le temps maximum pour chaque item est de 180 sec, mais si le/la participant(e) finit avant, la vitesse de traitement est notée.

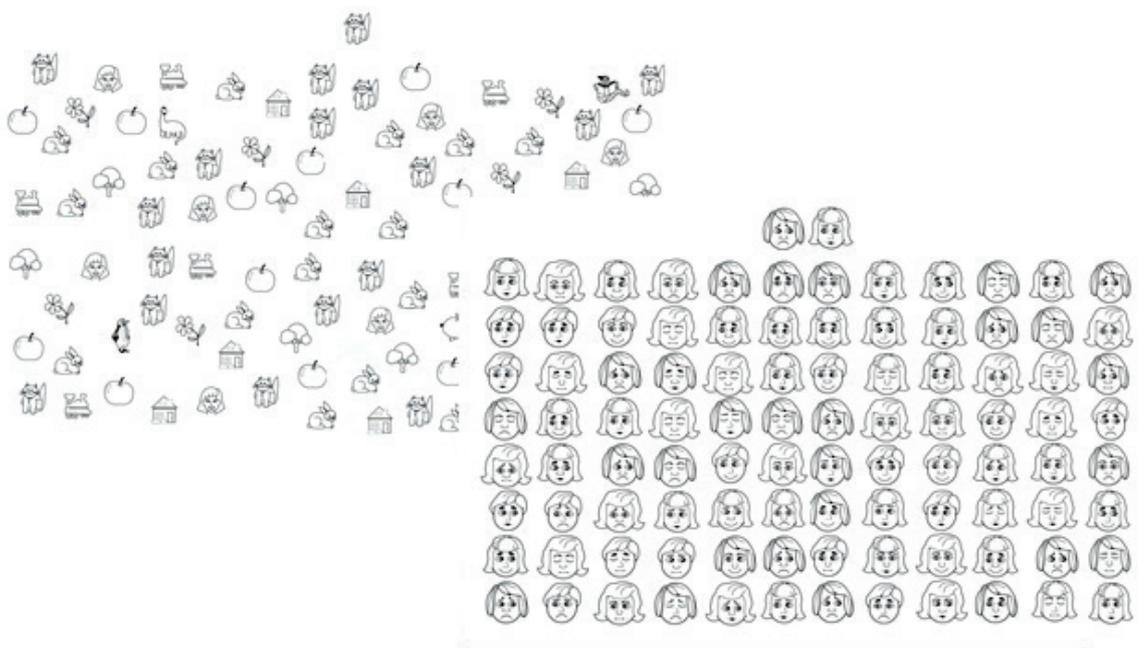


Figure B : Feuilles du test de barrage (NEPSY, Korkman et al, 2003)

3.2. Tests d'empan (MEM-III, Wechsler, 2001; Test du Buffer, Picard et al., 2012)

Les capacités de **mémoire à court terme** et de **mémoire de travail** sont mesurées par le test d'empan *verbal* et *visuo-spatial* endroit et envers de la MEM-III (Wechsler, 2001) et le test du *buffer épisodique* (Picard et al., 2012).

- Empan verbal

Le test d'empan verbal consiste à répéter des chiffres de plus en plus nombreux (présentation incrémentielle). Lors de la tâche d'empan verbal, l'expérimentateur dicte des suites de chiffres prédéfinies par la MEM-III, à une vitesse d'environ une seconde par chiffre. Les participants répètent les chiffres dans le même ordre que ce qu'ils ont entendu dans la tâche d'empan endroit, et dans le sens inverse dans la tâche envers. Les séries présentées sont croissantes commençant à deux chiffres et pouvant aller jusqu'à un maximum de neuf pour l'empan endroit et de huit pour l'empan envers. Pour chaque niveau, le/la participant(e) réalise deux essais. Après échec aux deux essais d'un même niveau, le test est arrêté et l'expérimentateur passe à l'exercice suivant. La valeur d'empan correspond à la taille maximale de la série réussie.

Exemple de séries d'empan :

Série de 5 items :

- Essai 1 4-2-7-3-1, réponse ...
- Essai 2 7-5-8-3-6, réponse ...

Série de 6 items: ...

- Empan visuo-spatial

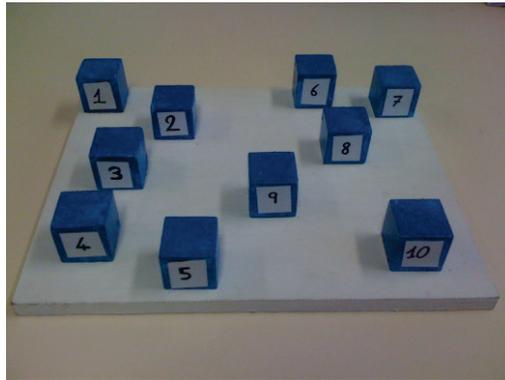


Figure C : cube de Corsi (MEM-III, Wechsler, 2001)

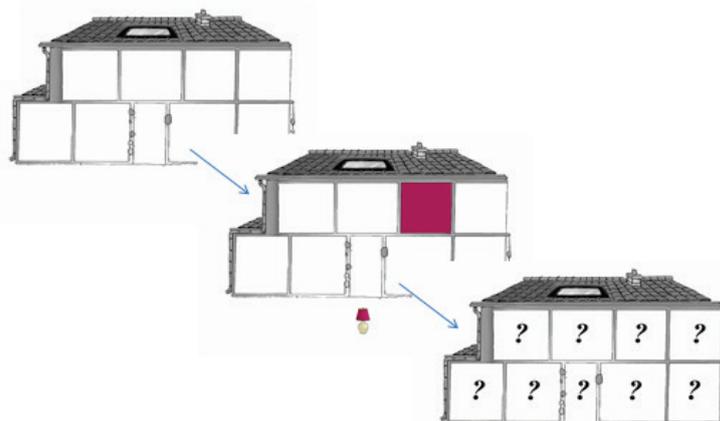
Le test d'empan visuo-spatial endroit et envers de la MEM-III, reprenant le test des blocs de Corsi (De Renzi & Nichelli, 1975) est réalisé. Le matériel est constitué d'une planche blanche (20 * 25 cm) sur laquelle sont fixés 10 cubes bleus de 3 cm².

L'expérimentateur pointe une succession de cubes à une vitesse d'environ une seconde par cube, mouvement que les participants doivent reproduire dans le même ordre (empan endroit) ou dans l'ordre inverse. Les séries vont de deux cubes jusqu'à un maximum possible de neuf cubes consécutifs pour l'empan endroit et huit pour l'empan envers, avec deux essais par niveau. Le critère d'arrêt est le même que pour l'empan verbal.

- Test du Buffer (Picard et al., 2012)

Enfin, le test informatisé du buffer épisodique (Picard et al., 2012) est constitué d'images d'une maison comprenant neuf pièces (sur deux étages) et d'images de dix éléments différents (vêtements, animaux ou objets).

Le test d'empan informatisé implique des informations verbales et visuo-spatiales destinées à évaluer la capacité du « buffer épisodique » de leur mémoire de travail (Picard et al., 2012). Des séries d'éléments (images d'objets, de vêtements ou d'animaux) apparaissent sous l'image d'une maison comprenant neuf pièces (sur deux étages). Chaque élément est présenté pendant 3 secondes à l'écran, dans une couleur spécifique temporairement identique à celle d'une pièce. Ainsi, une suite d'éléments et de pièces de même couleur apparaissent puis disparaissent ; les participant(e)s doivent rappeler la suite d'éléments et la pièce associée à chaque élément dans l'ordre de présentation des éléments, c'est-à-dire qu'ils doivent répondre pour chaque élément aux questions : « quoi », « où » et « quand ». Le nombre d'éléments présentés augmente au fur et à mesure de la tâche. Pour chaque niveau de difficulté, le/la participant(e) a trois essais pour indiquer tous les éléments et leur emplacement dans le bon ordre. L'expérimentateur arrête l'épreuve après deux erreurs de même niveau. Ici, le nombre maximum d'éléments montrés est de sept.



[Figure D](#) : Procédure/ exemple du test du buffer (Picard et al., 2012)

3.3. Test des Flèches (Korkman et al., 2003)

Le test des flèches de la NEPSY (Korkman et al., 2003), mesurant la **perception des directions**, est composé d'une cible entourée de huit flèches orientées dans diverses directions (deux pointent toujours vers le centre de la cible). Il y a 15 cibles différentes, de difficulté croissante.

L'ensemble des participants réalise le test des flèches de la NEPSY (Korkman et al., 2003) évaluant la perception des directions. Parmi les huit flèches orientées dans diverses directions, ils doivent désigner les deux flèches orientées vers le cœur de la cible, sans tracer avec le doigt le trajet de la flèche. Chaque participant(e) réalise quinze essais de difficulté croissante (les flèches qui ne vont pas au centre sont orientées de plus en plus proches du centre).

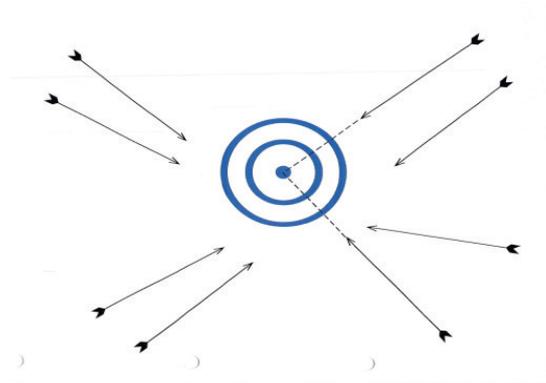


Figure E : Exemple au test des flèches (NEPSY, Korkman et al., 2003)

3.4. Test de compréhension de phrases C2 (Khomsî, 2001)

Le test de **compréhension de phrases** C2 provenant de l'ELO (Khomsî, 2001), est composé de 32 phrases accompagnées de quatre images par phrase. Les phrases sont de différents types (déclaratives, interrogatives, etc.) et de complexités diverses (par exemple « Le camion est suivi par la voiture », ou plus complexe « J'ai mangé tous les bonbons du paquet que la dame m'avait donné »).

Au cours de ce test, l'expérimentateur lit l'ensemble des phrases et présente les images associées à chaque phrase. L'enfant doit choisir l'image correspondant le mieux à la phrase, parmi les quatre proposées.

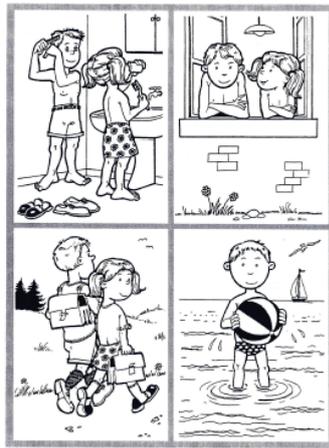


Figure F : Exemple au test C2 (Khomsî, 2001)

« Les enfants mettront leurs chaussures ».

3.5. Test de la maison (Hickmann et al., 2013)

Le test de « la maison » (Hickmann et al., 2013) évaluant la **production et la compréhension de prépositions spatiales et de verbes de mouvement** utilise une maison transportable Playmobile (5763), des personnages et des objets. Il est composé de quatre phases : une épreuve de production et une épreuve de compréhension de 12 prépositions spatiales puis une épreuve de production et une épreuve de compréhension de cinq verbes de mouvement. Les prépositions spatiales étudiées sont : « sur », « sous », « dans », « au-dessus », « au-dessous », « entre » et « droite »/ « gauche », ainsi que « devant » et « derrière » (toutes deux testées avec des objets orientés vs. non orientés). Il y a donc 12 items pour chacune des deux phases. Les verbes étudiés sont : « monter », « entrer », « descendre », « sortir » et « sauter ». L'ensemble des productions de l'enfant est enregistré.

Le test de « la maison » (Hickmann et al., 2013) évaluant la production et compréhension de prépositions spatiales et de verbes de mouvement est composé de quatre phases : une épreuve de production et une épreuve de compréhension pour 12 prépositions spatiales, puis une épreuve de production et une épreuve de compréhension pour cinq verbes de mouvement. L'ensemble des productions de l'enfant est enregistré.

Dans la phase de production des prépositions spatiales, l'expérimentateur met une figurine à divers endroits en indiquant les éléments de référence (ex. « là, c'est la table ») et demande à l'enfant de dire où la figurine est située (ex. « Nounours est sur la table »). Dans la phase de compréhension, l'expérimentateur demande à l'enfant de mettre la figurine dans différents endroits (ex. « mets nounours derrière maman »). Chaque enfant va réaliser les 12 items présentés dans un ordre fixe dans chacune des deux phases. Les items sollicitent la production ou compréhension des prépositions spatiales : « sur », « sous », « dans », « devant » (un objet orienté/ un objet non orienté), « derrière » (un objet orienté/ un objet non orienté), « au-dessus », « au-dessous », « entre » et « droite »/ « gauche ».

Dans la phase de production de verbes de mouvement, l'expérimentateur met une figurine à divers endroits en indiquant les éléments de référence et un contexte (ex. « Le papa est dans le salon et il veut aller se coucher. Il y a un escalier et ... Qu'est-ce qu'il doit faire ? Explique-moi »), puis demande à l'enfant de dire ce que fait le personnage. Dans la phase de compréhension de verbes de mouvement, l'expérimentateur demande à l'enfant de montrer ce que fait le

personnage (ex. « Nounours saute par-dessus la barrière »). Chaque enfant réalise cinq items par phase, afin d'étudier les verbes : « monter », « entrer », « descendre », « sortir » et « sauter ».



Figure G : illustration du test de la maison (Hickmann et al., 2013)

3.6. ENNI (Schneider et al., 2005)

L'Edmonton Narrative Norms Instrument (i.e. ENNI ; Schneider et al., 2005) évalue les habiletés de **production narrative**. Il est composé de quatre histoires présentées par des suites images : une histoire d'entraînement, suivie de trois histoires testes. Nous avons utilisé l'une des deux versions équivalentes de ces trois histoires (la version A), ainsi que les relances et les cotations de la version francophone du test.

L'expérimentateur montre une suite d'images racontant chacune une histoire et demande à l'enfant de raconter l'histoire. Il y a une histoire d'entraînement suivie de trois histoires testes. La qualité des premières mentions des entités (introduction appropriée ou non des référents dans le discours) et la structure de l'histoire sont cotées en fonction des grilles du test. Ainsi, les premières mentions sont cotées sur 21 (pour les histoires A1, A2 et A3). Un score de structure de l'histoire est calculé pour l'histoire A1 (sur 14) et pour l'histoire A3 (sur 40).



[Figure H](#) : illustration de test ENNI (Schneider et al., 2005)

3.7. MRT (Vandenberg & Kuse, 1978)

Le test de **rotation mentale** (MRT, Vandenberg & Kuse, 1978) est composé de 20 séries de cinq figures géométriques. Pour chaque série, deux figures représentent la figure initiale ayant subi une rotation.

Le/la participant(e) a huit minutes pour trouver l'ensemble des figures identiques à la figure initiale de chaque ligne.

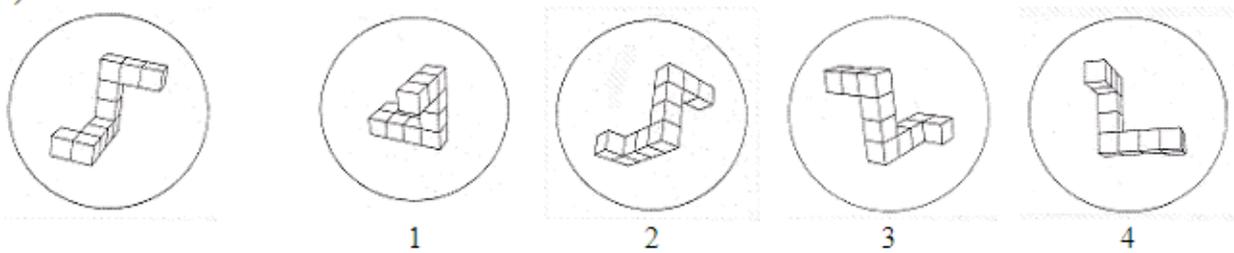
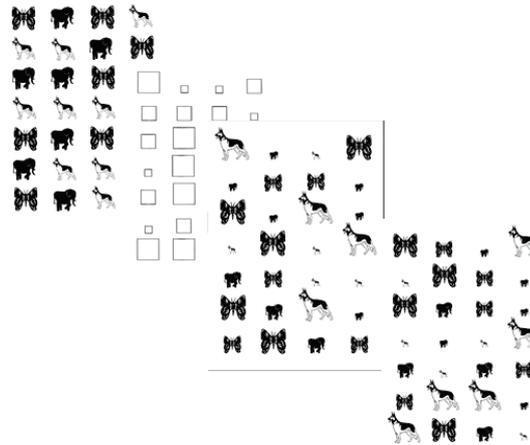


Figure I : illustration du MRT (Vandenberg & Kuse, 1948)

3.8. Test de Flexibilité-Inhibition (Pennequin, Nanty & Khomsi, 2004)



[Figure J](#) : illustration du test de Stroop animaux (Pennequin, Nanty & Khomsi, 2004)

La capacité de flexibilité-inhibition est mesurée par le test de Stroop animaux (Pennequin, Nanty & Khomsi, 2004). Ce test est composé de quatre phases. Chaque phase débute par 12 items d'entraînement. La première phase est composée d'images d'animaux (papillon, chien et éléphant). Il y a quatre images de taille identique par ligne (7 lignes * 4 pages) soit 112 items. La deuxième phase est constituée d'images de carrés de différentes tailles (trois tailles : petit, moyen, grand). Il y a de nouveaux quatre images par ligne (7 lignes * 4 pages), c'est-à-dire 112 images. Lors de la troisième et quatrième phase, les animaux présentés lors de la première phase sont de nouveau présentés mais la taille du dessin est non congruente avec la taille réelle de l'animal dans la nature. Lors de la première phase, le/la participant(e) doit regarder les dessins d'animaux et indiquer la taille réelle de ces animaux dans la nature (grand, moyen ou petit). Par exemple un papillon c'est petit. Il doit indiquer la taille du plus d'animaux possibles en une minute. Lors de la deuxième phase, le/la participant(e) doit indiquer la taille d'un maximum de carrés en une minute. Lors de la troisième phase, le/la participant(e) doit de nouveau indiquer la taille des animaux dans la nature en une minute. Enfin au cours de la dernière phase, le/la participant(e) doit alterner les indications de taille de l'animal dans la nature et la taille du dessin en une minute. Pour chaque ligne, le/la participant(e) doit débiter avec la taille de l'animal et finir avec la taille du dessin. Pour chaque phase, le nombre d'items traités et le nombre d'erreurs est noté. L'item traité à 30 secondes et à une minute est entouré. Si le/la participant(e) traite tous les items de la phase, le temps mis est indiqué.

- un **score d'inhibition** ($\text{Nombre d'items traités feuilles inhibition} - (\text{Nombre d'items traités feuilles Animaux} * \text{Nombre d'items traités feuilles Carrés}) / (\text{Nombre d'items traités feuilles Animaux} - \text{nombre d'items traités feuilles carrés})$)
- et un **score de flexibilité** ($\text{Nombre d'items traité feuille flexibilité} * 100 / \text{Nombre d'items traités feuille inhibition}$).

3.9. Scènes de famille (Wechsler, 2001)

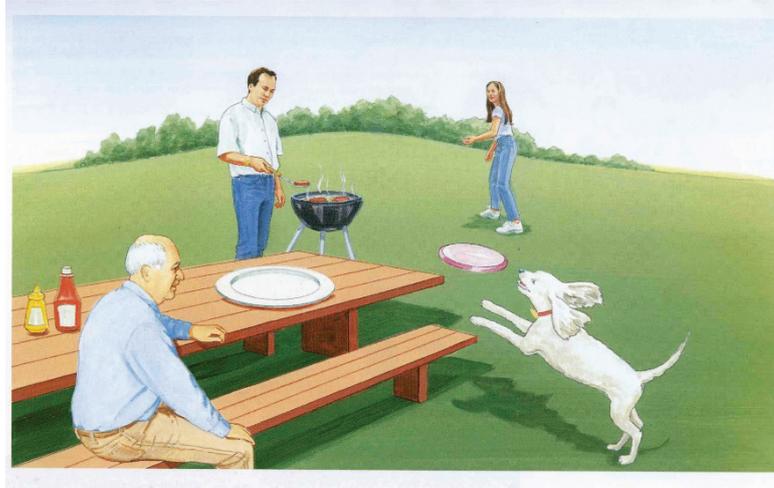


Figure K : illustration d'une scène de famille (Wechsler, 2001)

Afin d'évaluer les capacités de mémoire épisodique, le test de « scène de famille » (Wechsler, 2001) est proposé. Le matériel comprend une image de présentation de la famille (le père, la mère, la fille, le fils, le grand-père, la grand-mère et le chien), quatre images de scènes où quatre membres de la famille sont mis en situation (ou ont une action) (le pique-nique, le magasin, la campagne et le repas) et une image distinguant quatre zones d'une feuille blanche (en haut à droite, en haut à gauche, en bas à droite, et en bas à gauche). La famille est tout d'abord présentée. Il est indiqué au/à la participant(e) qu'il aura quelques secondes pour regarder et mémoriser des images où des personnes de cette famille sont en activité. Chaque scène est ainsi présentée 10 secondes, puis l'image suivante est présentée. Une fois les quatre scènes présentées, l'image distinguant les quatre zones est présentée. L'expérimentateur demande alors qui était présent lors de la première scène, la scène du pique-nique. Il demande également où chaque personnage était (à indiquer sur la feuille zonée) et ce qu'il faisait. Ces mêmes questions sont posées pour chaque scène. Les réponses sont notées et cotées. Un score sur 64 est ainsi obtenu pour chaque individu.

- La variable mesurée à l'épreuve de « scène de famille » est le **score de mémoire épisodique** sur 64.

4. Analyses des productions verbales et cartographiques

4.1. Codage des repères de l'itinéraire test

Tableau C : Emplacement et code des repères de l'itinéraire test

Emplacement	Code	Repère
1	ALI	Marchand de légumes/alimentaire
2	PBL	Poubelle + boîte aux lettres
3	PP1	Passage piéton 1
4	PP2	Passage piéton 2
5	PAC	Parc (tourne avant/ne passe ni devant ni dedans)
6	PKB	Parking sous terrain, « Public », bleu
7	RES	Restaurant rose (coté rouge)
8	RU1	Rue piétonne 1
9	BAT	Bâtiment -- avec 2 statues et quelques arbres
9	STA	Statues
10	BUS	Arrêt de bus (couvert)
11	MAI	Mairie (bâtiment avec des drapeaux français)
12	PP3	Passage piéton 3
13	POS	Bureau poste avec quatre boites aux lettres
13	BOI	Quartes boites aux lettres devant la poste (souvent trois sont citées)
14	BAR	Bureau Bar/tabac/brasserie « Philippe »
15	KEB	Kebab
16	CAM	(camion blanc à un carrefour)
17	KIO	Kiosque
18	PP4	Passage piéton 4
19	TOU	Tour bleue de bureau, en verre
20	RU2	Rue piétonne 2
21	PUB	2 Pubs SNCF
22	GAR	Gare
23	PKO	parking ouvert (en face de la gare)
24	BAG	Bâtiment gris, « vieux », en biais
24	VIR	Grand virage
25	PPP	Absence de passage piétons lors d'une traversé de rue
26	PLA	Place avec arbres
27	BAN	Deux bancs
28	FON	Fontaine (sur la place ci-dessus)
29	POR	Porte de garage (sur la gauche de la place, 2 ^{ème} du début ou 3 ^{ème} de la fin) = Arrivée
30	RPO	rond-point non vu mais cité lors de la carte (visible sur la carte)
Générique	GBL	Boites aux lettres
Générique	GPP	Passage piétons
Générique	GTR	Trottoirs
Générique	GVE	Véhicules
Générique	GLA	Lampadaires
Générique	GAB	Arbres

Générique	GPE	Personnes/ piétons
Générique	GBA	Bancs
Générique	GIM	Immeubles
Générique	GRO	Routes

Syntaxe des lignes de codes pour les repères (REP=repères)

\$:REP:mention;type-de-forme:animé-ou-non:exp-spatiale:référent:mot: {commentaire}

Mention

PM = première mention

MU = mention ultérieure

NM = no mention

Type de forme :

IND = indéfini (ex : « un monsieur »)

DEF = défini (ex : « le monsieur », « les [deux] personnes »)

POS = possessif (ex : « sa balle »)

NUM = numérique (ex : « deux personnes »)

AUT = autres

ANI/INA : Animé / inanimé

Expression spatiale :

ES = Expression explicite d'une relation spatiale – inclure tout ce qui est pertinent (par ex. « sur » mais aussi usages spatio-temporels « après » le passage piétons).

NS = Aucune expression spatiale

Exemple de codage

@Filename: 0940FITINori.cha

*EXP: sujet quarante.

*EXP: histoire de monsieur X.

*EXP: donc est ce que tu peux raconter maintenant euh # le trajet que tu viens de voir avec le plus de détails possibles, pour que si jamais quelqu' un # qui ne connaît pas la ville veut refaire le trajet, il puisse sans se tromper et sans demander à quelqu'un?

*SUI: bah # on est [/] bah # quand on était au point de départ , quand on a [/] on est allé tout droit, on a vu une euh [/] # bah # une grande poubelle avec un boîtier aux lettres à côté .

\$REP:PM:IND:POU:ES:une-grande-poubelle :{tout droit}

\$REP:PM:IND:POU:ES:un-boîtier-aux-lettres:{erreur-genre, à-côté}

*SUI: après on euh # on est passé sur un passage piétons.

\$REP:PM:IND:PA1:ES:un-passage-piétons:{sur}

*SUI: donc après le passage piétons , on a[/] # il y avait encore un passage piétons.

\$REP:PM:IND:PA2:ES:-un-passage-piétons:{après-encore}

*SUI: on a tourné euh # à gauche #.

*SUI: euhm ## après on a vu trois boîtes aux lettres euh.

\$REP:PM:NUM:POS:ES:trois-boîtes-aux-lettres:{après}

*SUI: on a [/] # on a tourné vers la droite .

*SUI: euh # après on a continué.

*SUI: et après on a retourné vers la gauche , après on a continué tout droit euhm ##.

*SUI: et ## après je ne me rappelle plus .

Etc..

5. Matériel des expériences 2 et 3

5.1. Histoire introductive, expériences 2 et 3 : La disparition de l'agent 201

Un agent a disparu. Avant de disparaître il nous a envoyé des vidéos de plusieurs lieux où il est allé mais ces vidéos ne peuvent être vues que deux fois. Tu ne peux pas voir l'agent mais tu pourras suivre le chemin qu'il a pris. Il faudra bien faire attention à tous les endroits où il est allé. Après il faudra faire un rapport: tu devras raconter ce qu'il a fait et par où il est passé.

5.2. Ordre de présentation des itinéraires tests (expériences 2 et 3)

Tableau D : Ordre de présentation des trois itinéraires (ville A, B, C, version 1 ou 2)

	Ordre de présentation des itinéraires		
Groupe 1	A1	B1	C1
Groupe 2	A2	C2	B2
Groupe 3	B1	C2	A1
Groupe 4	B2	A2	C1
Groupe 5	C1	A1	B2
Groupe 6	C2	B1	A2

5.3. Ordre des tests de restitution de l'expérience 2 et 3

Tableau E : Ordre des tests de restitution de l'expérience 2 et 3

Ordre 1	Description	Repères audio	Repères visuels	Directions
Ordre 2	Description	Repères visuels	Repères audio	Directions
Ordre 3	Description	Repères visuels	Directions	Repères audio
Ordre 4	Repères visuels	Description	Directions	Repères audio
Ordre 5	Repères visuels	Description	Repères audio	Directions
Ordre 6	Repères visuels	Directions	Description	Repères audio

Note : la description verbale est toujours avant la reconnaissance auditive des repères ET la reconnaissance visuelle des repères est toujours avant le l'épreuve de choix des directions

5.4. Images des repères des villes A, B et C de l'expérience 2 et 3

Tableau F : Triade et paires des repères des villes A, B et C de l'expérience 2 et 3

	Position / Paire	Ville A	Ville B	Ville C
Placement I	1	Mairie 	Gare 	Musée 
	2	Halles/ Arcades 	Eglise 	Bâtiment gris 
Placement II	1	Boulangerie 	Boucherie 	Pharmacie 
	2	Fleuriste 	Librairie 	Magasin de chaussures 

Placement III	1	Brasserie 	Tabac 	Bijouterie 
	2	<i>Parking souterrain</i> 	<i>Bureau de poste /</i> Poste 	<i>Pompe à essence</i> 
Placement IV	1	Kiosque- (<i>Marchant de journaux</i>) 	Alimentation 	<i>Marchant de Kebab</i> 
	2	<i>Parterre de fleurs</i> 	Statue 	Fontaine 
Placement V	1	<i>Tour bleue</i> 	<i>Tour Verte</i> 	<i>Tour blanche</i> 
	2	<i>Aire de jeux</i> 	<i>Arrêt de bus</i> 	<i>Croix</i> 

Note : items en vert = items sans indice verbal

5.5. Extrait du test de similarité



Aspect Sémantique :

Dénomination =

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

Différent

Similaire

Aspects Visuels

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

Différents

Similaires

5.6. Ordre de présentation des itinéraires tests, expérience 2

Tableau G : Ordre de présentation des itinéraires, expérience 2

	Ordre de présentation des itinéraires		
Groupe 1	A1	B1	C1
Groupe 2	A2	C2	B2
Groupe 3	B1	C2	A1
Groupe 4	B2	A2	C1
Groupe 5	C1	A1	B2
Groupe 6	C2	B1	A2

Note : trois villes équivalentes A, B et C * 2 versions par ville (1 et 2) selon la position des repères

5.7. Listes des 10 items visuels cibles et similaires présentés au cours des tests de reconnaissance

Tableau H : Listes des numéro d'items visuels cibles (6) et similaires (4) présentés au cours des tests de reconnaissance (Version de 1 à 5)

	Items cibles						Items similaires			
Version 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Version 2	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6
Version 3	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2
Version 4	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8
Version 5	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4

Note : chaque numéro d'image correspond à un repère spécifique pour chaque ville (correspondance indiquée tableau E)

5.8. Liste des items audio cibles et distracteurs de chaque ville et leur fréquence d'occurrence

Tableau I : Liste des items audio cibles et distracteurs de chaque ville et leur fréquence d'occurrence (SFI des CP-CM2, emanulex)

Ville	Cible	SFI	Distracteur	SFI
A	Aire de jeux	45,12 + 61,7	Terrain de basket	59,55 + 45,04
A	Boulangerie	51,13	Poissonnier	38,24
A	Brasserie	39,66	Piscine	59,58
A	Fleuriste	47,45	Chocolaterie	41,02
A	Magasin de journaux	59,51 + 57,27	Magasin de vêtements	59,51 + 55,37
A	Mairie	54,36	Hôpital	55,5
A	Parking sous-terrain	50,11	supermarché	52,02
A	Parterre de fleurs	41,75 + 61,72	Pont en bois	59,42 + 66,63
A	Tour bleue	66,07 + 58,60	Tour rouge	66,07 + 65,87
B	Arrêt de bus	53,47	Cinéma	60,36
B	Boucherie	47,53	Cordonnier	48,86
B	Eglise	55,38	Ecole	66,61
B	Gare	58,75	Police	59,04
B	Librairie	50,47	Magasin de meubles	59,51 + 51,66
B	Magasin d'alimentation	59,51 + 50,37	Magasin de Vélos	59,51 + 61,60
B	Poste	58,68	Garage	56,33
B	Statue	48,32	Bassin	53,03
B	Tabac	> 10 millions	Crêperie	> 1 million
B	Tour verte	66,07 + 59,49	Usine	53,24
C	Bijouterie	33,09	dentiste	54,99
C	Croix	54,87	Patinoire	45,98
C	Fontaine	53,75	Parc	57,98
C	Kebab	> 14 millions	Pizzeria	> 43 millions
C	Magasin de chaussures	59,51 + 58,82	Magasin de bonbons	59,51 + 50,83
C	Musée	57,01	Théâtre	59,28
C	Pharmacie	52,26	Coiffeur	52,56
C	Station-service	53,08 + 58,53	Banque	52,91
C	Tour blanche	66,07 + 61,96	Château	> de 24 millions

Distracteurs également présent dans l'épreuve de reconnaissance visuelle

Item non indexé par emanulex (SFI remplacé par occurrence google)

6. Analyses des descriptions

6.1. Codage des repères des itinéraires tests des expériences 2 et 3

Tableau J : Codage des repères et vecteurs des trois itinéraires tests des expériences 2 et 3

V1	V2	Ville A		V1	V2	Ville B		V1	V2	Ville C	
6	12	MAI	Maire	17	20	GAR	Gare	19	24	MUS	Musée
12	6	HAL	Halle	20	17	EGL	Eglise	24	19	BAG	Bâtiment gris
7	18	BLG	Boulangerie	3	5	BCH	Boucherie	21	14	PHA	Pharmacie
18	7	FLE	Fleuriste	5	3	LIB	Librairie	13	21	CHA	Magasin chaussures
9	14	BRA	Brasserie	7	22	BTC	Bar Tabac	3	8	BIJ	Bijouterie
14	9	PKB	Parking sous terrain bleu	22	7	POS	Poste	8	3	ESS	Pompe à essence
20	11	KIO	Kiosque	15	18	ALI	Alimentaire	6	16	KEB	Kebab
11	20	PDF	Parterre de fleurs	18	15	STA	Statue	15	6	FON	Fontaine
16	24	TBE	Tour bleue	13	9	TVT	Tour verte	9	18	TBC	Tour blanche
24	16	JEU	Aire de jeux	10	13	BUS	Arrêt de bus	18	9	CRO	Croix
3	FEU	Feux tricolore		19	ABC	Arbre entouré de bancs		7	TRO1,2	Trottoir 1,2	
5,22	PP1,2	Passage piéton 1, 2		12/11	PP1	Passage piéton 1		5,11/12	PP1,2,3	Passage piéton 1, 2, 3	
10	PLA	Place de la mairie/halle		9/12, 16,	PLA 1, 2	Place (1 :bus) (2 :gare/église)		17/10	PLA	Place (croix)	
8, 13, 17, 19, 23	RU1, 2, 3,4	Rue piétonne 1,(2),3,(4),5		2, 4, 6, 8,14, 21	RU1, 2, (3), 4, 5,6	Rue piétonne 1,2,3,4		2, 12/13, 14/15, 16/17, 20,22, 23	RU1, 2,3	Rue piétonne 1,2,(3), 4,5,6, 7	
4,21	RO1,2	Route 1,2		11/10	RO1	Route 1		4, 10/11	RO1,2	Route 1,2	
2,15	TR1,2	Trottoir départ,2		1	VOI	Voiture de départ		1	VOI	Voiture de départ	
1	VOI	Voiture de départ		23	ARR	Arrivée (porte bleu)		25	ARR	Arrivée	
25	ARR	Arrivée									

V1, V2 : ordre d'emplacement suivant la version de l'itinéraire (Version 1 ou 2)

6.2. Codage des termes génériques des itinéraires tests des expériences 2 et 3

Tableau k : Codage des termes génériques des trois itinéraires tests des expériences 2 et 3

GPP	Passages piétons	GPE	Personnes
GRO	Routes	GVE	Véhicules
GRU	Rues	GLA	Lampadaire
GTR	Trottoirs	GAB	Arbres
GIM	Immeubles	GBA	Bancs
GBL	Boîtes aux lettres	GBP	Poubelles

+AUT = autre repère

Syntaxe des lignes de codes pour les repères (REP=repères)

\$:REP:mention;type-de-forme:Verbe|vb infinitif:exp-spatiale|ESforme:réfèrent:mot-repère :
{commentaire}

Mention

PM = première mention

MU = mention ultérieure

NM = no mention

Type de forme :

IND = indéfini (ex : « un monsieur »)

DEF = défini (ex : « le monsieur », « les [deux] personnes »)

POS = possessif (ex : « sa balle »)

NUM = numérique (ex : « deux personnes »)

AUT = autres

ZZZ= abs

Verbe : VSS (statique), VMM (mouvement), VXX (autre), VZZ (abs)

Expression spatiale :

ES = Expression explicite d'une relation spatiale – inclure tout ce qui est pertinent (par ex. « sur » mais aussi usages spatio-temporels « après » le passage piétons).

NS = Aucune expression spatiale

6.3. Structures des itinéraires des trois villes testes des expériences 2 et 3

La structure de chacune des trois villes (I, II et III) comporte 16 évènements composés d'un cadre (A), de l'évènement (B) et pour 14 d'entre eux d'une direction (C). Le détail des informations considérées comme correctes est indiqué ci-dessous.

Les repères peuvent être situés à deux positions distinctes suivant leur version. Les repères positionnés dans la deuxième version sont entre parenthèse. Par exemple, dans la ville I, évènement 4, la mairie a été présentée à cette position lors de la version 1 de l'itinéraire mais a été remplacée par la halle lors de la version 2.

Lorsque plusieurs éléments existaient dans la ville, des chiffres leur était associés, correspondant à leur ordre d'apparition. Par exemple, passage piéton 1 correspond au premier passage piéton.

- | Ville I | |
|--|---|
| 1) A) Cadre initial : dans la voiture
B) Evènement initial sortir de la voiture | B) tourner/ prendre à gauche
C) à gauche |
| 2) A) sur le trottoir jusqu'au passage piéton 1 / au feu
B) Avancer/ aller
C) tout droit/ jusqu' | 7) A) rue 2- à droite, Brasserie (Parking) à droite, place Halle (Mairie)-parterre de fleurs (Kiosque)
B) Passer/ continuer
C) tout droit/ devant |
| 3) A) la route/le passage piéton 1 / vers le trottoir en face
B) Traverser la route/ prendre le passage piéton tout droit / prendre le trottoir en face
C) tout droit/ en-face | 8) A) Rue piétonne 3 - à gauche/ Parking (Brasserie)
B) Passer/avancer
C) tout droit/ jusqu' |
| 4) A) sur le trottoir/ devant la maire (Halle)
B) tourner
C) à droite, vers la mairie (Halle) | 9) A) Parking (Brasserie)/ fin de la rue piétonne/ avant route
B) Tourner
C) à droite |
| 5) A) sur trottoir, devant la mairie(Halle), boulangerie (fleuriste)
B) Passer/avancer
C) Tout droit/ jusqu'a | 10) A) trottoir droite 2- vers Tour bleue (Jeux)
B) Avancer
C) tout droit/ jusqu' |
| 6) A) après la boulangerie (Fleuriste), 1 ^{ère} rue/intersection 1 | 11) A) Tour bleue (jeux), rue piétonne 4 à droite
B) Tourner
C) à droite avant |
| | 12) A) Fleuriste (Boulangerie) à gauche- route à droite/ jusqu'au Kiosque
B) Passer/avancer |

- C) tout droit/ jusqu'
- 13) A) Kiosque (parterre de fleurs)- rue 5 à gauche
B) Tourner
C) à gauche devant
- 14) A) passage piéton 2 -route 2
B) Traverser/ Passer sur/prendre

Ville II

- 1) A) Cadre initial : dans la voiture
B) Evènement initial sortir de la voiture
- 2) A) rue piétonne 1, Boucherie/rue piétonne 2
B) Avancer
C) tout droit/vers
- 3) A) Intersection/rue piétonne 2, Boucherie (librairie) en face
B) tourner
C) à droite
- 4) A) Intersection/rue piétonne 3, Librairie (Boucherie) à droite
B) Passer/avancer/ continuer
C) tout droit/ devant
- 5) A) 2^{ème} rue/intersection 1, Bar-Tabac (Poste)
B) tourner/ prendre
C) à gauche
- 6) A) rue piétonne 4/ Place bus, arrêt bus (tour verte)
B) Passer/ continuer / avancer
C) tout droit/devant/ vers
- 7) A) passage piéton 1, route
B) Traverser
C) tout droit/ en face
- 8) A) rue piétonne 4/ tour verte (Place bus, arrêt bus)
B) Passer/ continuer/ avancer

- C) Tout droit/ en face
- 15) A) rue piétonne 6 - en face, jeux (tour bleue)
B) Prendre/ avancer/continuer
C) devant/ en face/ tout droit
- 16) A) Porte rouge, rue à droite
B) s'arrêter

- C) tout droit jusqu'
- 9) A) rue piétonne 5/ Tour verte (place bus)
B) Tourner
C) à droite dans/ après
- 10) A) rue piétonne 5/ place de la gare (Eglise), alimentation (statue) en face
B) Avancer/ passer
C) tout droit/ jusqu'
- 11) A) place de la gare (Eglise) à droite, alimentation (statue)
B) Tourner à gauche
- 12) A) place de la gare (Eglise), statue (alimentation), rue piétonne à gauche
B) Continuer/ avancer/ passer
C) tout droit/ devant
- 13) A) rue piétonne 6/ Eglise (gare), Arbre entouré de bancs/ bout de la place
B) Avancer / continuer
C) tout droit/ jusqu'
- 14) A) rue piétonne 6/ Eglise (gare), Arbre entouré de bancs/ bout de la place
B) Tourner
C) à gauche
- 15) A) rue piétonne 6- droite/ Poste
B) continuer/ passer
C) tout droit/ devant
- 16) A) Porte bleue
B) Arriver

Ville III

- 1) A) Cadre initial : dans la voiture
B) Evènement initial sortir de la voiture
- 2) A) rue piétonne 1
B) Avancer/ continuer
C) tout droit / en face
- 3) A) Intersection/route 2, Bijouterie (Pompe à essence)
B) tourner
C) à gauche
- 4) A) Intersection/route 1, passage piéton 1
B) traverser
C) tout droit/ en face
- 5) A) Kebab (Fontaine)- station-service (Bijouterie)
B) Passer/ continuer/ avancer
C) tout droit/ devant
- 6) A) rue piétonne 2/ Tour blanche (Place croix/ croix)
B) Aller/ continuer ou tourner
C) jusqu' / à droite
- 7) A) passage piéton 2, route 2
B) Traverser/ prendre
C) A droite / tout droit (si indiqué à droite avant)
- 8) A) rue piétonne 3, rue piétonne 4 à droite/ Magasin de chaussures à gauche
B) continuer/ avancer
C) tout droit/ devant
- 9) A) rue piétonne 5/ fontaine (Kebab)
B) aller
C) jusqu'
- 10) A) rue piétonne 5/ fontaine (Kebab)
B) Tourner
C) à gauche
- 11) A) place avec croix (tour blanche) gauche, Musée (bâtiment gris) droite
B) Continuer
C) tout droit, devant
- 12) A) rue piétonne 6/ après Musée
B) Tourner /Prendre
C) à gauche
- 13) A) rue piétonne 6/ Pharmacie (chaussures)/ rue piétonne 7
B) Prendre / avancer
C) tout droit vers, jusqu'
- 14) A) rue piétonne 6, rue piétonne 7/ Pharmacie (Chaussure)
B) Tourner
C) à droite
- 15) A) rue piétonne droite/ Bâtiment gris (Musée) gauche
B) continuer/ avancer
C) tout droit/ jusqu'
- 16) A) Porte en fer/ bout de la rue
B) Arriver

6.4. Contrebalancement de l'ordre des tâches concurrentes et des épreuves de restitution

Chaque participant voit trois villes, la première dans une condition contrôle et les deux autres dans une condition de double tâche de « tapping » ou de répétition verbale (babobi).

Suite à chaque itinéraire, les participants réalisent l'ensemble des tâches, soit en commençant par une tâche de description verbale ou une tâche de reconnaissance visuelle des repères. Lors du deuxième itinéraire vu, l'ordre des tâches est modifié.

Tableau L: tableau de contrebalancement de l'ordre des tâches concurrentes et des épreuves de restitution

	Double Tâche			Restitution à introduction visuelle ou verbale			
	1 ^{ère} ville	2 ^{ème} ville	3 ^{ème} ville	entraînement	1 ^{ère} ville	2 ^{ème} ville	3 ^{ème} ville
Groupe 1	Contrôle	Babobi	Tapping	Visuelle	Verbale	Visuelle	Verbale
Groupe 2	Contrôle	Babobi	Tapping	Verbale	Visuelle	Verbale	Visuelle
Groupe 3	Contrôle	Tapping	Babobi	Visuelle	Verbale	Visuelle	Verbale
Groupe 4	Contrôle	Tapping	Babobi	Verbale	Visuelle	Verbale	Visuelle

Notes :

- Ordre de présentation des itinéraires aléatoire
- Restitution à introduction
 - « **Verbale** » : ordre 1,2 ou 3 (expérience 2) ;
 - « **Visuelle** » : ordre 4, 5 ou 6 (expérience 2)