



UNIVERSITE DE BOURGOGNE

URF Sciences Humaines, Département de Psychologie

THÈSE

*Pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université de Bourgogne
Discipline : **Psychologie***

Par

Raphaëlle BERTRAND

Mercredi 15 octobre 2014

Maintien à court terme de l'information
chez l'enfant de 2 à 6 ans :
oubli temporel et aide au maintien du but

Directrices de thèse

Pr. Valérie Camos et Pr. Annie VINTER

Jury :

Agnès BLAYE, *Professeur à l'Université d'Aix-Marseille*

Rapporteur

Michel FAYOL, *Professeur à l'Université de Clermont-Ferrand*

Rapporteur

Valérie CAMOS, *Professeur à l'Université de Fribourg*

Directrice

Annie VINTER, *Professeur à l'Université de Bourgogne*

Directrice

“Stop thinking, just do it.”

Dr Yang Jwing-Ming

*“Il n’est rien d’impossible
pour qui trouve la paix intérieure ».*

Maître Shifu

Remerciements

« Une thèse, c'est un marathon couru en sprint ». Telles ont été les paroles de Valérie Camos, le jour où elle m'a proposé de réaliser ce travail de thèse avec elle. Ce jour-là, je n'ai bien sûr pas mesuré l'ampleur de ses propos... Aujourd'hui, après avoir cumulé quatre ans de travail de recherche avec un travail à plein temps, l'écriture d'articles et la tenue de cours à l'Université, c'est chose faite. Je tiens à la remercier très chaleureusement de m'avoir donné cette opportunité sans m'en cacher la difficulté (même si je n'ai pas trop écouté...) et de me l'avoir donnée alors qu'elle savait par avance que les conditions n'étaient pas des plus favorables pour elle étant donné son et mon emploi du temps, mais aussi notre éloignement. Merci donc pour sa grande disponibilité, son écoute et son empathie, sa capacité à s'adapter à l'autre et à ses particularités, pour le partage qu'elle fait spontanément et en toute simplicité et humilité de ses connaissances et de ses expériences, ses encouragements et ses conseils toujours judicieux.

Je tiens également à remercier tout particulièrement, Annie Vinter, ma directrice de thèse également. Sans elle, cette thèse n'aurait pas pu voir le jour, ne serait-ce que parce qu'elle m'a guidée, bien avant ce projet, sur la voie qui est la mienne aujourd'hui. Ainsi, après m'avoir passionnée en première année de master lors de ses cours sur le développement du bébé, elle m'a habilement conseillée pour la réalisation de ma deuxième année de Master professionnel et a accepté de présider la soutenance de mon mémoire. En acceptant de diriger cette thèse avec Valérie Camos, elle m'a en outre ouvert les portes de l'Université de Bourgogne pour réaliser ce travail. Un grand merci pour ses encouragements, sa disponibilité et sa cordialité chaque fois que nous nous sommes rencontrées, et ce en dépit des nombreuses responsabilités qui sont les siennes au quotidien.

Bien sûr, je tiens à remercier vivement Madame Agnès Blaye et Monsieur Michel Fayol d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ma thèse. Au-delà du temps passé à lire ce manuscrit et à le corriger, c'est un grand honneur pour moi qu'ils aient accepté de porter de l'attention à mon travail, et ce, malgré leurs emplois du temps chargés et leur éloignement géographique.

Je tiens aussi à remercier Messieurs Pierre Barrouillet et Chris Jarrold pour avoir accepté de faire partie de mon comité de suivi de thèse et de m'avoir accompagnée tout au long de ces quatre années. Leurs commentaires suite aux rapports rédigés chaque année m'ont été précieux et m'ont permis d'affiner ma compréhension des problématiques et l'analyse de mes données.

Au sein du Laboratoire d'Etude de l'Apprentissage et du Développement, je voudrais remercier l'ensemble des professeurs, des étudiants et du personnel administratif qui, malgré le fait que je sois une doctorante « fantôme », m'ont toujours très cordialement accueillie. Ils ont su, à chacun de mes passages éclairés, me mettre à l'aise en me considérant comme l'une des leurs. Merci à Gérôme, Lucie, Arnaud, Luc, Lolita et Yannick, avec un petit clin d'œil particulier à Aurélie et Mélanie, mes compagnes de mésaventures de Travaux dirigés de cette

dernière année universitaire. Merci aussi à Anne-Laure, Benoît et Vanessa du laboratoire de Fribourg, pour leur simplicité et leur accueil.

En ce qui concerne l'aspect plus expérimental et pratique de cette thèse, je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont permis de rassembler les données contenues dans cette thèse. Ainsi, je remercie Mme Annie Simonet, qui a été mon inspectrice durant les trois premières années de thèse ainsi qu'Eric Lorient son successeur. Je les remercie de m'avoir fait confiance et m'avoir permis d'aménager mon emploi du temps afin de réaliser les passations. Merci également à Mme Top, inspectrice de Beaune qui a accepté mon intervention dans une des écoles de son secteur. Rien n'aurait été possible bien sûr sans le concours de mes nombreux collègues professeurs et instituteurs des écoles maternelles d'Arnay-le-Duc, Beaune (Blanches Fleurs), Bligny sur Ouche, Jouey, Lacanche, Pouilly en Auxois, Précý-sous-Thil, Semur en Auxois (Les Remparts), Viévy. Merci à eux de m'avoir fait confiance, de m'avoir ouvert si gentiment les portes de leurs classes et de s'être adapté(es) à ma présence lors de mes passages. Une mention spéciale à Sandrine et Isabelle pour leur enthousiasme tout particulier à participer à l'étude. Un grand merci également aux étudiantes qui m'ont aidé à réaliser les passations : Lydia Jeannin, Mildred Durieux-Viana et Coralie Séraffin. Une mention spéciale, là encore, à Izabela Stan-Zahno qui a courageusement récolté une par une les autorisations parentales des élèves de crèche et halte-garderie et qui a ensuite réalisé les passations. Merci aux crèches de Fribourg qui lui ont permis de faire les passations : Gribouille, Carré de sable, Mille Pattes, Barbotine, Les coquelicots. Un grand merci aux parents qui ont accepté que leur(s) enfant(s) participe(nt) à l'étude et aux enfants qui ont si bien joué le jeu, puisque c'en était un.

Mes derniers remerciements vont à mes amis et à ma famille. Merci à Nathou et Yannick, Manu et Seb, Chantal et Pierre, Hélène et Cyril mais aussi Joël Vernet pour leur soutien indéfectible et leur écoute. Merci à mes parents, Léon et Christiane, et mes sœurs, Frédérique et Fabienne. Ils m'ont encouragée et soutenue par bien des aspects, et ce, depuis toujours. Merci pour leur amour et pour avoir toujours tout fait pour m'aider à progresser et prendre confiance en moi. Une mention spéciale à mon papa qui a largement participé à l'élaboration du matériel expérimental (boîte à ouverture électronique, pistes de ski etc). Merci aussi à mon pître d'oncle Gérard qui, lui aussi, a toujours eu confiance en moi et m'a encouragée à maintes reprises tout au long de ces quatre années. Il a su par son humour me remonter le moral, et ce bien des fois !

Enfin, et pour clore sur le meilleur, je remercie avec tout l'amour et la chaleur possible ma petite famille. Tout d'abord mon partenaire de vie, Laurent, sans qui rien de tout cela n'aurait été possible. Merci à toi pour ton soutien, ton amour, toute la confiance que tu as placée en moi et pour m'avoir permis de réaliser ce projet. Merci d'avoir toujours su trouver les mots soit pour me remonter le moral, soit pour dédramatiser les choses en me rappelant ce qui était le plus important. Cette thèse est aussi la tienne et celle de notre petite Agathe. Merci à ma magnifique petite fille qui dès le début, en étant mon petit porte-bonheur intégré lors de mes examens de master 1, m'a accompagnée et donné la force d'avancer. Merci à toi mon petit cœur.

Résumé

La mémoire de travail est un composant essentiel de la pensée qui est fortement impliquée dans les apprentissages et la réussite scolaires. Pourtant, elle est rarement étudiée chez l'enfant d'âge préscolaire, du fait notamment d'un manque de paradigmes adaptés. Cette thèse visait donc à étudier le fonctionnement de la mémoire de travail chez cette population, soit entre 2 et 6 ans. Pour cela, deux paradigmes originaux ont été utilisés. Ils ont été conçus pour être proches de situations de jeux, propices à aider le jeune enfant à focaliser son attention sur la tâche. Ainsi, il a tout d'abord été montré que les performances de rappel diminuaient au fil du temps, et ce, même en l'absence de tâche interférente. Les enfants de cette tranche d'âge opèrent donc un maintien passif de l'information, i.e. sans mise en œuvre spontanée de stratégie de maintien de l'information. De plus, le déclin de l'information était similaire au travers de l'âge. Pour la première fois, il a donc été mis en évidence que la vitesse d'oubli de l'information ne variait pas entre 2 et 6 ans. Finalement, aucun de ces deux facteurs, i.e. mise en œuvre de stratégie de maintien de l'information et modification de la vitesse d'oubli de l'information, ne peut être avancé pour expliquer l'augmentation des capacités mémorielles entre 2 et 6 ans. Ensuite, il a été montré que les caractéristiques intrinsèques de la tâche pouvaient conduire à une amélioration des performances de rappel, peut-être par la mise en œuvre d'une stratégie de maintien. Notamment, la réalisation d'une activité motrice, i.e. marche durant le délai de rétention, a permis à ces jeunes enfants de contrecarrer dans une certaine mesure l'oubli temporel de l'information. La mise en œuvre d'une activité motrice, en dirigeant l'attention du jeune enfant vers un indice visuel du but à atteindre, aiderait celui-ci à maintenir le but de la tâche en mémoire. Les ressources attentionnelles ainsi dégagées pourraient être mises au service d'une amélioration des performances de rappel, peut-être par la mise en œuvre d'une stratégie de maintien.

Mots clés : mémoire de travail, enfants d'âge préscolaire, vitesse d'oubli de l'information, maintien passif, aide au maintien du but, mise en œuvre motrice, indice visuel.

Abstract

Working memory is an essential component of thought that is highly involved in learning and academic achievement. However, it is rarely studied in preschoolers, mainly because of a lack of suitable paradigms. Therefore, this thesis investigated the functioning of working memory in children between 2 and 6 years. For this purpose, two original paradigms were used. They were designed to be close to game situations which should help young children to focus their attention on the task. Firstly it was shown that the recall performance decreased over time, even in the absence of an interfering task. Children of this age therefore use a passive maintenance, i.e. without spontaneously implementing any strategy of maintenance. Furthermore, the decline of the information was similar through age. For the first time, it has been demonstrated that the rate of information forgetting did not vary between 2 and 6. Finally, none of these two factors, i.e. implementation of a strategy of maintenance and change in the speed of forgetting can explain the increase in memory capacity between 2 and 6 years of age. Secondly, it has been shown that the intrinsic characteristics of the task could lead to improved recall performance, perhaps by inducing a strategy of maintenance. Particularly, the implementation of a motor activity, i.e. walking during the retention period, has enabled these young children to counteract to some extent the temporal decay of information. Then, the implementation of a motor activity, by directing the attention of young children to a visual cue related to the goal of the task, help them to maintain in memory the purpose of the task. Attentional resources could be harnessed to improve performance of recall, perhaps by implementing a retention strategy.

Keywords: working memory, preschoolers, rate of forgetting, passive maintenance, helping goal maintenance, implementation of motor activity, visual clue.

Table des matières

INTRODUCTION.....	1
PARTIE THÉORIQUE	3
1. LA MEMOIRE DE TRAVAIL CHEZ L'ENFANT	4
1.1. <i>Construction historique de la notion de mémoire de travail.....</i>	5
1.2. <i>Différences entre mémoire à court terme et mémoire de travail.....</i>	7
1.3. <i>Mémoire de travail et habiletés scolaires</i>	10
1.4. <i>Paradigmes d'étude de la mémoire de travail chez le jeune enfant</i>	13
1.4.1. <i>Etudes chez le bébé.....</i>	14
1.4.2. <i>Etudes chez les enfants d'âge scolaire.</i>	18
1.4.3. <i>Un paradigme valable pour les 2-6 ans.....</i>	21
2. LE FONCTIONNEMENT DE LA MEMOIRE DE TRAVAIL	23
2.1. <i>Des modèles de mémoire de travail.....</i>	23
2.1.1. <i>Le modèle à Composantes Multiples</i>	23
2.1.2. <i>Le modèle des Processus Emboîtés.....</i>	25
2.1.3. <i>Le modèle du Partage Temporel des Ressources</i>	26
2.2. <i>Les limites en mémoire de travail</i>	28
3. LES FACTEURS LIES AU DEVELOPPEMENT DE LA MEMOIRE DE TRAVAIL.....	32
3.1. <i>Développement neuronal et spécialisations neuronales</i>	32
3.2. <i>Amélioration des traitements de base.....</i>	34
3.3. <i>Amélioration des stratégies : macro-niveau vs micro-niveau</i>	38
3.4. <i>Amélioration du contrôle attentionnel.....</i>	43
4. FONCTIONS EXECUTIVES ET CONTROLE ATTENTIONNEL CHEZ LE JEUNE ENFANT.....	46
4.1. <i>Définition des fonctions exécutives et lien avec la mémoire de travail</i>	46
4.2. <i>La gestion du but par le jeune enfant</i>	49
4.3. <i>Un modèle de production d'un comportement orienté vers un but</i>	51
4.4. <i>L'apport particulier de l'activité motrice sur le contrôle attentionnel.....</i>	53
5. PRESENTATION DE LA RECHERCHE.....	57
5.1. <i>Création d'un paradigme pour l'étude des jeunes enfants.....</i>	58
5.2. <i>Le déclin temporel de l'information chez les jeunes enfants.....</i>	60
5.3. <i>Impact de la motricité sur le maintien du but</i>	61

PARTIE EXPERIMENTALE	64
6. CREATION D'UN PARADIGME POUR L'ETUDE DES JEUNES ENFANTS	65
6.1. <i>Introduction d'un délai : notion de contrainte temporelle en MDT.....</i>	69
6.2. <i>Introduction d'une tâche concurrente : notion de contrainte spatiale en MDT.....</i>	70
6.3. <i>Charge attentionnelle de la tâche concurrente : notion de limite énergétique en MDT .</i>	73
7. VITESSE D'OUBLI DE L'INFORMATION CHEZ LE JEUNE ENFANT.....	102
7.1. <i>Deux courants de recherche : objectifs spécifiques aux âges étudiés</i>	103
7.2. <i>Les trois facteurs limitant la MDT selon le TBRS.....</i>	104
7.3. <i>Etudier la vitesse de déclin de l'information chez le jeune enfant.....</i>	108
8. IMPACT DE LA MOTRICITE SUR LES PERFORMANCES DE RAPPEL	157
8.1. <i>Impact de la motricité sur le fonctionnement cognitif.....</i>	158
8.2. <i>Maintien du but en mémoire chez le jeune enfant</i>	163
8.3. <i>Etudier l'impact de la motricité et de la vision d'un indice relié au but de la tâche</i>	166
DISCUSSION GENERALE	199
9. DISCUSSION GENERALE	200
9.1. <i>Facteurs en jeux dans l'amélioration développementale de l'empan entre 2 et 6 ans.</i>	204
9.1.1. <i>Vitesse de l'oubli de l'information.....</i>	205
9.1.2. <i>Mise en œuvre de stratégie de maintien de l'information</i>	208
9.1.3. <i>Augmentation des ressources attentionnelles / amélioration du contrôle attentionnel.....</i>	211
9.2. <i>Aide au maintien du but de la tâche en mémoire chez le jeune enfant.....</i>	214
9.2.1. <i>Impact de l'introduction d'une tâche secondaire motrice.....</i>	215
9.3. <i>Impact de la vision d'un indice lié sémantiquement au but de la tâche</i>	218
10. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	221
BIBLIOGRAPHIE	223

Liste des tableaux

Tableau 6.1 : fréquence des mots (selon Manulex, Lété, Sprenger-Charolles, & Colé, 2004 ; et Lexique) et âge d'acquisition objectif en mois, selon Chalard et al (2003).	79
Tableau 6.2 : Répartition des sujets au sein des groupes en fonction de l'ordre de passation des conditions expérimentales.	84
Tableau 7.1. Proportions d'erreurs en fonction du type d'erreurs (surproduction, omission, ordre, identité) et de l'âge des sujets (4, 5 et 6 ans). Les écarts-types sont indiqués entre parenthèses.	118
Tableau 7.2. Nombre total d'erreurs dans les essais à 1 fruit (sur 128 essais) en fonction du délai de rétention (0, 2, 4 et 6 secondes) et de l'âge (4, 5 et 6 ans).....	121
Tableau 7.3. Nombre d'erreurs commises dans les essais à 1 fruit en fonction de l'âge (i.e., 2 ans à 2 ans et demi, 2 ans et demi à 3 ans, 3 ans à 3 ans et demi) et du délai (i.e., 0, 3 ou 5 secondes) s'écoulant entre présentation du modèle et rappel.....	131
Tableau 7.4. Proportion d'erreurs en fonction du type d'erreurs (Surproduction, Omission, Identité, ou Ordre), du délai avant rappel (0, 4, 8 ou 12 secondes) et de l'âge (4, 5 ou 6 ans). Les écarts-types sont indiqués entre parenthèses.	140
Tableau 8.1 : Distances entre le modèle et l'étal de la marchande en fonction de l'âge (4, 5 et 6 ans) et de la condition expérimentale de rappel différé (rappel court vs rappel long).	183
Tableau 8.2. Temps en secondes nécessaire pour atteindre l'étal de la marchande en fonction de l'âge (4, 5 et 6 ans), du délai avant rappel (court vs long) et de la présence d'un indice visuel (visible vs caché). Les écarts-types sont indiqués entre parenthèses.	184

Liste des Figures

Figure 1.1 : Trois exemples de tâches d'empan complexe pour une série de longueur 3 ...	19
Figure 2.1 : le modèle à Composantes Multiples de Baddeley (1986).....	24
Figure 2.2 : Le modèle des Processus Emboîtés de Cowan (1999)	25
Figure 3.1 : L'espace total de Traitement, Case et al. (1982, 1985).....	35
Figure 3.2 : Exemple d'une tâche d'empan où le nombre d'items à traiter (les chiffres) durant l'épisode de traitement est manipulé, ainsi que la durée totale de l'épisode de traitement. Le maintien consiste à mémoriser les lettres.	40
Figure 3.3. Illustration des 3 conditions expérimentales de l'expérience de Camos et Barrouillet (2011) où charge cognitive de la tâche (items à traiter) et temps total de traitement ont été manipulés.	41
Figure 6.1. Photographies du matériel utilisé, fruits en plastique et sac transparent.	80
Figure 6.2 : Empan moyen observé en fonction de la condition expérimentale de rappel (Immédiat, Différé Simple, Marchande, Pierres).Les barres correspondent aux erreurs standard.	86
Figure 6.3 : Pourcentage de fruits rappelés dans une position conforme au modèle en fonction de la condition expérimentale de rappel (Immédiat, Différé Simple, Marchande, Pierres).Les barres correspondent aux erreurs standard.	88
Figure 6.4 : Pourcentage de fruits rappelés dans une position conforme au modèle en fonction de la condition expérimentale de rappel (Immédiat, Différé Simple, Marchande, Pierres) et du groupe d'appartenance des sujets (forts vs faibles). Les barres correspondent à l'erreur standard.	90
Figure 6.5 : Nombre moyen de fruits rappelés (de 1 à 4) en fonction de la position du fruit (1er à 4ème) et de la condition expérimentale de rappel (Immédiat, Différé, Marchande, Pierres).Les barres représentent l'erreur standard.	92
Figure 7.1 Boîte et son dispositif électronique d'ouverture minutée.....	113
Figure 7.2 Empan moyen en fonction du délai entre la présentation du modèle et la réalisation par l'enfant (0, 2, 4 et 6 secondes) et l'âge (4, 5 et 6 ans). Les barres représentent l'erreur standard.	115
Figure 7.3 Empan corrigé en fonction du délai entre la présentation du modèle et la réalisation par l'enfant (0, 2, 4 et 6 secondes) et de l'âge des sujets (4, 5 et 6 ans). Les barres représentent l'erreur standard.	117
Figure 7.4. Empan moyen sans tenir compte de l'ordre en fonction du délai entre la présentation du modèle et la réalisation par l'enfant (0, 2, 4 et 6 secondes) et l'âge (4, 5 et 6 ans). Les barres représentent l'erreur standard.	120
Figure 7.5. Empan moyen en fonction du délai avant le rappel en secondes (0, 3 et 5 secondes) et de l'âge des sujets (2-2,6 ans ; 2,6-3 ans et 3-3,6 ans). Les barres correspondent aux erreurs standards.....	127
Figure 7.6. Proportion d'items rappelés dans une position conforme au modèle en fonction du nombre de fruits à rappeler (1, 2, 3 ou 4) et de l'âge (2 à 2 ans et demi, 2 ans et demi à 3 ans, 3 ans à 3 ans et demi). Les barres correspondent aux erreurs standards.....	129

Figure 7.7. Dispositif comprenant les deux pistes de skis, les poupées en bois et le dispositif électronique.	135
Figure 7.8 Jeu des six poupées.	136
Figure 7.9 Dispositif électronique, réglé via une minuterie, permettant d'illustrer l'attente avant le départ de la course (diode rouge) puis d'indiquer le départ de la course (allumage d'une diode verte et émission d'un signal sonore).....	137
Figure 7.10. Matériel utilisé pour expliquer la tâche.	137
Figure 7.11 Empan moyen en fonction du délai en secondes (0, 4, 8 et 12) et de l'âge (4, 5 et 6 ans).	139
Figure 7.12. Nombre d'essais réussis (sur 2) pour les essais à 1 poupée en fonction du délai de rétention (0, 4, 8 et 12 secondes) et l'âge (4, 5 et 6 ans).	142
Figure 7.13. Proportion d'items correctement restitués en fonction du délai de rétention en secondes (0, 4, 8 et 12 secondes) et de l'âge (4, 5 et 6 ans). Les barres représentent les erreurs standards.	143
Figure 8.1 Mise en œuvre des conditions expérimentales de rappel introduisant une tâche secondaire motrice.....	170
Figure 8.2 Empan moyen en fonction de l'âge (4, 5 et 6 ans) et de la condition expérimentale de rappel (Immédiat, différé simple, différé avec indice et différé sans indice). Les barres correspondent aux erreurs standards.	172
Figure 8.3. Empan corrigé en fonction de l'âge (4, 5 et 6 ans) et de la condition expérimentale de rappel (Immédiat, différé simple, différé indicé et différé non indicé). Les barres correspondent aux erreurs standards.	174
Figure 8.4. Empan corrigé proportionnel en fonction de la condition expérimentale de rappel (Différé indicé, Différé simple et Différé non indicé) et de l'âge (4, 5 et 6 ans). Les barres représentent l'erreur standard.	175
Figure 8.5. Illustration des 5 conditions expérimentales de rappel (immédiat, différé indicé court, différé indicé long, différé non indicé court, différé non indicé long).	182
Figure 8.6. Empan moyen observé en fonction de l'âge (4, 5 et 6 ans), de la visibilité de l'indice (visible vs caché) et du délai écoulé avant rappel.	187
Figure 8.7. Empan en mémoire en fonction de l'âge (4, 5 et 6 ans), du délai avant rappel (immédiat vs long) et de la présence d'un indice visuel relié au but de la tâche (indice visible vs caché).	188
Figure 8.8. Différence de performances avec le rappel immédiat en fonction de l'âge (4, 5 et 6 ans), du délai (court vs long) et de la présence d'un indice visuel (visible vs caché).	189

INTRODUCTION

La mémoire de travail est un composant essentiel de la pensée. Elle est au centre de tout apprentissage chez le nouveau-né en soutenant des acquisitions développementales fondamentales comme l'acquisition du langage, le comportement orienté vers un but mais aussi l'attention conjointe. Elle joue donc un rôle prépondérant dans le développement de l'enfant, que ce soit dans le versant cognitif, social, mais aussi scolaire. En effet, l'efficacité de la mémoire de travail est un très bon prédicteur de la réussite dans les apprentissages académiques tels que le français ou les mathématiques.

Etudier la mémoire de travail chez le jeune enfant représente donc un enjeu fort car c'est dans la petite enfance que se construisent toutes les compétences et les savoirs de base nécessaires à la scolarité ultérieure. Mais c'est aussi durant cette période de la vie que les changements développementaux sont les plus forts. En effet, le développement de la mémoire de travail est particulièrement lié à la myélinisation, à la maturation et à la spécialisation de structures neuronales se développant de manière très intense entre 2 et 6 ans. Pourtant, les études sur la mémoire à court-terme et la mémoire de travail portent essentiellement sur les enfants avant 2 ans ou après 6 ans. Deux raisons principales peuvent expliquer cet état de fait. La première raison est une quasi-absence de paradigmes adaptés à l'étude de la période d'âge comprise entre 2 et 6 ans. En fait, cette période d'âge est une période de transition entre des bébés et de très jeunes enfants qui ont peu d'habiletés motrices et surtout parlent très peu ou pas du tout, à des enfants qui ont déjà des acquis (i.e., langage, lecture, comptage, calcul) sur lesquels les chercheurs peuvent construire des paradigmes dérivés de ceux employés dans la recherche chez l'adulte. D'autre part, les très jeunes enfants peuvent être évalués par des méthodes ne requérant pas nécessairement leur participation motivée (i.e., temps de fixation relatif, rythme de succion, électroencéphalogramme etc). Les enfants après 6 ans peuvent quant à eux être évalués objectivement au travers de leurs habiletés langagières. Surtout, ils sont plus enclins que les enfants plus jeunes à maintenir leur attention et à autoréguler leur comportement pour répondre à une consigne proposée par un adulte. Les contraintes méthodologiques de

l'étude des enfants entre 2 et 6 ans sont donc particulièrement fortes. La deuxième raison pouvant expliquer ce manque d'études chez les enfants entre 2 et 6 ans est la difficulté d'accès aux enfants de cette tranche d'âge dans les pays anglo-saxons où les enfants ne sont pas scolarisés avant l'âge de 5 voire 6 ans. Il est donc difficile pour les chercheurs de tester des populations importantes d'enfants du fait de contraintes matérielles difficiles à contourner.

Le but des recherches menées dans le cadre de cette thèse était donc d'étudier le maintien à court-terme chez le jeune enfant, entre 2 et 6 ans. Profitant de la facilité d'accès à des populations importantes d'enfants en France, puisque scolarisés en école maternelle dès 3 ans pour la grande majorité d'entre eux, les études ont été menées à l'aide d'un paradigme original, accessible à l'ensemble des enfants de cette période d'âge. La création puis la première expérimentation de ce paradigme avec des enfants de 5 ans sont le point de départ de ce travail de thèse. Puis, élargissant notre recherche à l'ensemble de la tranche d'âge ciblée, le fonctionnement même de la mémoire de travail chez le jeune enfant a été étudié au travers de quatre expériences menées avec ce même paradigme et au travers d'un autre paradigme, original lui aussi. Ces recherches avaient pour but d'étudier d'une part la vitesse de déclin de l'information en mémoire chez le jeune enfant, et d'autre part l'impact d'une activité motrice sur le maintien des informations, activité motrice dirigée ou non vers un indice visuel relié au but de la tâche à accomplir. Les objectifs particuliers et les résultats de chaque étude seront présentés dans la partie expérimentale, après avoir dressé un cadre théorique permettant de comprendre tout d'abord la conception du paradigme, puis le choix des variables manipulées au sein de chaque expérience.

PARTIE THÉORIQUE

1. La mémoire de travail chez l'enfant

Au quotidien, tout un chacun peut être amené à mémoriser pour un temps court des informations avant de les utiliser, par exemple lorsqu'une personne nous dicte un numéro de téléphone que l'on prend en note immédiatement. Dans cette situation très simple, la mémoire à court terme nous permet de maintenir actives ces informations durant un temps court. Cependant, plus fréquemment nous réalisons, et sans même nous en apercevoir, plusieurs activités dans le même temps. Par exemple, nous conduisons tout en chantant en rythme les paroles de notre morceau favori qui passe à la radio, nous lisons et réalisons les étapes d'une recette de cuisine tout en surveillant l'enfant qui joue à côté de nous... Le fait de pouvoir ainsi penser à plusieurs choses à la fois, de poursuivre simultanément plusieurs buts, ou encore de planifier plusieurs actions dans le même temps, est possible grâce à un composant essentiel de la pensée : la mémoire de travail. Levinson, Smallwood et Davidson (2012) ont ainsi montré que les personnes qui ont le plus de facilités à penser à plusieurs choses à la fois sont aussi celles qui ont les meilleures capacités en mémoire de travail. On perçoit bien intuitivement à quel point ce composant est prépondérant dans la construction des apprentissages où il est nécessaire de faire des liens entre les connaissances déjà acquises, stockées en mémoire à long terme, et les connaissances nouvelles, planifier de nouvelles procédures, gérer les sous-buts permettant d'atteindre le but final de l'activité, inhiber les informations qui ne sont pas pertinentes etc. Il suffit pour cela de se remémorer les difficultés à apprendre à conduire... Cependant, on s'aperçoit aussi que, lorsqu'on effectue une tâche difficile qui demande beaucoup d'attention pour être menée à son terme, alors on échoue à la mener à bien si l'on est distrait par un événement extérieur, ou si des pensées parasites nous assaillent. Cela est dû au fait que la mémoire de travail possède des limites qui lui sont propres et qui peuvent gêner la réalisation concomitante de tâches simultanées. Ainsi, la mémoire de travail, essentielle à la réalisation de toutes les opérations cognitives de haut niveau est un élément complexe, à capacité limitée, et dont le fonctionnement reste encore à préciser. C'est justement chez le jeune enfant que le fonctionnement de la mémoire de travail est le moins décrit dans la littérature, alors que c'est durant la petite enfance que les changements développementaux sont les plus importants et que les habiletés scolaires trouvent leur fondement. Comprendre le

fonctionnement de la mémoire de travail chez les jeunes enfants, c'est en comprendre le développement et, dans le même temps, c'est comprendre les désordres développementaux et éducatifs.

Afin de poser des bases théoriques à la compréhension des études menées, nous verrons dans un premier temps comment le concept complexe de mémoire de travail s'est construit peu à peu dans l'histoire de la psychologie développementale et cognitive. Cela nous amènera à préciser les différences existantes entre la mémoire à court terme et la mémoire de travail et à comprendre les liens étroits entre la mémoire de travail et les apprentissages scolaires. Enfin, nous examinerons quels sont les paradigmes traditionnellement utilisés pour évaluer l'efficacité de la mémoire de travail chez l'enfant.

1.1. Construction historique de la notion de mémoire de travail

La mémoire humaine a toujours beaucoup intéressé les chercheurs en psychologie. Dès 1890, James distinguait la mémoire primaire, comprenant une quantité limitée d'informations situées dans le champ de la conscience et ce pour un temps court, de la mémoire secondaire laquelle comprend les informations apprises tout au long de la vie, stockées pour une durée illimitée. Les termes de mémoire de travail datent quant à eux d'un livre de Miller, Galanter et Pribram (1960). Ces auteurs expliquaient que lors de la mise en œuvre d'une tâche complexe, telle que la compréhension de l'écrit ou encore la résolution de problèmes, un individu doit maintenir actifs en mémoire l'objectif à atteindre, un plan global d'exécution mais aussi l'ensemble des sous-objectifs nécessaires pour atteindre le but. Ces informations, servant à guider l'action, sont maintenues actives dans ce que les auteurs nomment la mémoire de travail (MDT).

Cependant, avec l'essor de la psychologie cognitive, les termes de mémoire à court terme (MCT) et de mémoire à long terme (MLT) ont été davantage employés (Atkinson et Shiffrin, 1968). Dès 1956, Miller tenta de quantifier le nombre d'éléments pouvant être maintenus actifs dans la MCT. Pour cela, il inventa la tâche d'empan qui consistait à faire répéter à des sujets, immédiatement après leur présentation, des listes de mots (ou de non-mots) comportant, au fur et à mesure des essais, de plus en plus d'items. L'empan d'un sujet est déterminé par le nombre maximal d'items qu'il est capable de rappeler sans erreur. Miller découvrit ainsi que la capacité mémorielle d'un adulte était d'environ 7, plus ou moins

2 items qu'il s'agisse de mots, de lettres ou encore de chiffres. Cependant, les informations peuvent aussi être groupées en chunks, c'est-à-dire un groupe d'informations portant une signification propre. Ainsi, les trois lettres M, B et I peuvent être regroupées en un seul chunk, I.B.M., aisé à traiter et à maintenir. Si le sujet groupe l'information en chunks, alors la capacité mémorielle de la MCT serait davantage de 3 ou 4 éléments (Broadbent, 1975 ; Cowan, 2001), que ceux-ci soient rapides ou longs à articuler ou encore impossibles à articuler (Glanzer & Razel, 1974 ; Gobet & Clarkson, 2004).

Suite aux travaux de Miller, la limitation de la MCT n'a été expliquée, pendant des années, que par la seule limitation de la capacité de stockage. Cependant, Baddeley et Hitch (1974) ont réintroduit rapidement la terminologie « mémoire de travail » parce qu'ils voulaient insister sur le rôle de cette mémoire dans la réalisation des opérations cognitives : la MDT est impliquée non seulement dans le stockage des informations, mais également dans la réalisation simultanée d'un traitement d'où l'importance du mot « travail ». D'ailleurs les auteurs ont observé que l'ajout d'une tâche cognitive secondaire, si elle fait chuter les performances, n'entraîne pas la disparition des effets de primauté et de récence traditionnellement attribués à la MCT. Ainsi, pour Baddeley et Hitch, MDT et MCT sont clairement dissociables. A partir de là, les études en psychologie cognitive et développementale se sont davantage intéressées à quantifier les capacités de traitement et à comprendre le fonctionnement même de la MDT.

Pour autant, définir la MDT n'est pas aisé, surtout qu'elle peut être décrite selon différents niveaux d'analyses, selon qu'on veut la définir chez le bébé ou chez l'adulte par exemple ou qu'on veut la définir sur un plan structurel ou fonctionnel. Dans leur livre, Miyake et Shah (1999) ont demandé aux auteurs ayant participé à la rédaction des chapitres de définir la MDT. Il en a résulté que les définitions ont beaucoup varié d'un auteur à l'autre. Baddeley et Logie (1999) ont décrit la MDT comme « les composants fonctionnels de la cognition qui permettent aux êtres humains de comprendre et de se représenter mentalement leur environnement immédiat, de retenir l'information de leur expérience passée et immédiate, de soutenir l'acquisition de nouvelles connaissances, de résoudre des problèmes, de formuler leurs buts présents, de les relier et d'agir sur eux » (p. 28-29). Cette définition fonctionnelle place la MDT au centre de toute activité cognitive de haut niveau.

Plus simplement et parce qu'ils étudient plus particulièrement les bébés, Pelphrey et Reznick (2002) considèrent que la MDT réfère aux processus qui permettent à l'organisme de stocker temporairement et de manipuler une quantité d'informations limitée afin de réaliser des tâches ou des comportements cognitifs variés. D'autres auteurs ont défini la MDT comme étant la partie active de la mémoire à long terme, c'est-à-dire la partie sur laquelle s'oriente l'attention, alors que la MCT renverrait à la partie passive (Engle, Tuholski, Laughlin & Conway, 1999). Plus schématiquement, Engle et al. (1999) établissent la relation suivante : $MDT = MCT + \text{contrôle attentionnel}$. Conway et al. (2005) rejoignent cette définition en parlant d'un « système à multiples composantes responsable d'un maintien actif de l'information parallèlement à un traitement et/ou une distraction » (p. 770). D'après Cowan et Alloway (2009), Baddeley (1986) et Cowan (1988, 1999) considèrent que la MDT comprend l'ensemble des processus qui incluent à la fois les parties actives et passives de la mémoire (p. 304). Finalement, pour parvenir à un consensus, on peut dire que la MDT est un composant de la pensée ressemblant à un focus attentionnel, une conscience, une entité polyvalente qui ne pourrait traiter qu'une petite quantité d'informations à la fois mais qui peut faire des merveilles avec (Cowan & Alloway, 2009).

Si les définitions de la MDT diffèrent ainsi, c'est parce que les auteurs se réfèrent à des modèles théoriques précis. Dans le chapitre 2, les trois modèles de MDT qui semblent être les principaux actuellement dans le champ de la recherche seront présentés. Ceci permettra de comprendre les fondements théoriques de la présente recherche. Mais avant cela, parce que la MDT est un concept qui découle de celui de MCT, et aussi parce la MDT est souvent définie par référence ou par comparaison avec la MCT, précisons la nature de leurs différences.

1.2. Différences entre mémoire à court terme et mémoire de travail

Dès les années 1970, les néo-piagétiens identifiaient la capacité de stockage à court terme comme une ressource critique dans le développement de la pensée et du raisonnement (Case, 1978, 1991 ; Pascual-Leone, 1970). En fait, la MCT diffère de la MDT dans le sens où la MCT implique uniquement le stockage et le rappel d'une quantité d'information limitée alors que la MDT introduit la manipulation et/ou la transformation de

cette information maintenue active en mémoire (Baddeley & Hitch, 1974 ; Case, 1978 ; Cowan, 1999 ; Engle, Kane & Tuholski, 1999 ; Kail & Hall, 2001 ; Schneider & Pressley, 1997). Il en résulte que MCT et MDT diffèrent à la fois par la nature des tâches qu'elles permettent de réaliser, mais aussi par les structures neuronales qui les sous-tendent.

Ainsi, MCT et MDT ne permettent pas de mener à bien le même type de tâches car le maintien en MCT est passif, ou statique, alors que le maintien en MDT est actif, ou dynamique (Baddeley, 2012). Le rappel d'informations stockées en MCT ne demande qu'une « lecture » du matériel stocké, alors que le rappel d'informations dans une tâche de MDT demande un traitement préalable avant le rappel. Ainsi, traditionnellement, les capacités en MCT sont évaluées par des tâches d'empan simple alors que les capacités en MDT le sont par des tâches d'empan inverse ou encore par des tâches d'empan complexe. Dans la tâche d'empan simple, les items (chiffres, lettres, non-mots etc) sont présentés au sujet et celui-ci doit, immédiatement après la présentation, les restituer à l'identique. Dans la tâche d'empan inverse, le sujet doit manipuler, traiter l'information qu'il a à maintenir car, cette fois, il doit rappeler les items dans l'ordre inverse de leur présentation. Il doit donc les maintenir et, dans le même temps, les réorganiser en mémoire pour réussir à les restituer dans un ordre inverse. Bien sûr, ce traitement doit être fait en inhibant les informations non pertinentes qui surgissent invariablement, qu'elles soient liées aux items à maintenir ou qu'elles proviennent de l'environnement du sujet. Dans une tâche d'empan complexe, tâche censée évaluer spécifiquement la capacité de la mémoire de travail, le sujet doit mener de front le maintien et le traitement d'informations. Par exemple, dans la tâche de *running span* telle que celle proposée par Morris et Jones (1990), les sujets voient des séries de consonnes, présentées une par une, sans savoir à l'avance le nombre de consonnes contenues dans la série. Au signal, les sujets doivent rappeler les 4 dernières consonnes de la série. Du fait que les sujets ne connaissent pas à l'avance le nombre de lettres de la série, ils ne peuvent adopter la stratégie d'ignorer les items non pertinents (par exemple les 8 premiers items d'une série de 12) pour se concentrer sur les 4 derniers items de la liste. Il est donc nécessaire que les sujets mettent constamment à jour les données contenues en MDT. Ainsi, il apparaît que les tâches simples requièrent que l'information soit maintenue durant un délai alors que les tâches plus complexes requièrent la mise à jour et la manipulation des informations. Ceci est confirmé par des études menées auprès d'enfants et d'adolescents

qui montrent la distinction entre stockage passif et stockage actif, ceux-ci se révélant être des facteurs séparés (Alloway, Gathercole, Willis & Adams, 2004 ; Gathercole, Pickering & Ambridge, Wearing, 2004). Alloway, Gathercole et Pickering (2006) ont, elles aussi, réalisé une large étude évaluant les capacités mémorielles d'enfants de 4 à 11 ans comprenant des tâches, simples vs. complexes, portant sur du matériel verbal vs. visuo-spatial. Il en ressort que, dès 4 ans, on peut observer une distinction entre MCT et MDT et que cette distinction reste stable au cours du développement. De plus, alors que le maintien à court terme se fait selon des capacités spécifiques liées à la nature de l'information (verbale vs visuo-spatiale), la MDT est pilotée par un mécanisme général indépendant du domaine auquel appartiennent les informations. Ainsi, les tâches simples évalueraient uniquement les capacités de système de stockage à court terme, capacités spécifiques au format des informations, alors que les tâches plus complexes nécessiteraient l'implication supplémentaire d'un mécanisme de contrôle d'ordre plus général. Cette distinction entre stockage spécifique et mécanisme de contrôle d'ordre général rejoint des études antérieures chez les enfants (Gathercole, Pickering et al., 2004) comme chez les adultes (Kane et al., 2004 ; Park et al., 2002). Les mesures d'empan complexes ne sont par ailleurs que modérément corrélées avec les mesures des capacités de stockage verbal (Gathercole, Alloway, et al., 2004). Ceci montre, là encore, que MCT et MDT sont dissociées. D'ailleurs, Engle et al. (1999) considèrent que la MDT résulte de l'association entre le stockage à court terme (MCT) et de l'attention contrôlée qui peut être dévolue au traitement. Comme nous le verrons plus avant, la MDT et le contrôle attentionnel sont en effet fortement liés.

Cette distinction entre MCT et MDT se confirme par les structures et les zones neuronales impliquées dans la réalisation des tâches que l'une et l'autre permettent de mener à bien. Smith et Jonides (1999) ont montré avec des études de neuro-imagerie que les patterns d'activation sont différents selon que la tâche requière un simple stockage ou bien qu'elle nécessite que des opérations cognitives soient menées sur les données stockées. De plus, il a été montré que les tâches requérant un traitement ou bien une mise à jour des informations maintenues actives en mémoire activaient additionnellement des régions cérébrales associées au contrôle attentionnel, notamment le cingulum antérieur et le cortex préfrontal dorso-latéral (Braver et al., 1997 ; Bunge, Klingberg, Jacobsen, & Gabrieli, 2000 ; D'Esposito, Postle, Ballard, & Lease, 1999 ; Rypma, Prabhakaran, Desmond,

Glover, & Gabrieli, 1999 ; Smith & Jonides, 1999). Jonides et al. (1997) mais aussi Cohen et al. (1997) ont aussi observé que le niveau d'activation dans le cortex préfrontal augmentait en même temps que la difficulté du traitement à opérer sur les informations. Enfin, D'Esposito et al. (1995) ont quant à eux mis en évidence que le cortex préfrontal était impliqué lorsque les sujets devaient réaliser deux tâches simultanément (une tâche de jugement sémantique et une tâche de rotation spatiale) alors qu'il n'était pas activé quand les mêmes sujets réalisaient l'une ou l'autre tâche individuellement.

On peut donc conclure de ces différentes études qu'il existe un lien très fort et spécifique entre le cortex préfrontal et les capacités en MDT. D'autre part, il apparaît que MCT et MDT engagent des traitements neuronaux bien différents, supportés par des zones neuronales spécifiques, le cortex préfrontal étant fortement impliqué dans les tâches complexes de MDT. On sait par ailleurs que le cortex frontal est très en lien avec les capacités d'attention, notamment la flexibilité attentionnelle et le contrôle inhibiteur (Kane & Engle, 2002 ; Osaka et al., 2003).

On comprend ainsi que Baddeley et Hitch (1974) aient réintroduit la terminologie de mémoire de travail. Le mot « travail » peut en effet recouvrir un grand nombre de processus cognitifs incluant la manipulation d'informations et/ou un stockage simultané, le contrôle de l'attention, l'utilisation de l'attention pour accomplir une tâche cognitive ou encore l'inhibition de réponses prédominantes. Ainsi, la MDT s'appuie fortement sur les fonctions exécutives. De plus, elle est fortement sollicitée lors des apprentissages scolaires où les situations de tâches multiples sont nombreuses. Il en résulte que l'efficacité de la MDT est fortement en lien avec la construction des habiletés scolaires, bien plus encore que la simple mesure du quotient intellectuel (Alloway & Alloway, 2010).

1.3. Mémoire de travail et habiletés scolaires

L'efficacité de la MDT est un très bon prédicteur des performances dans les habiletés académiques de type lecture ou mathématiques (Unsworth & Engle, 2007a), mais aussi plus généralement du comportement scolaire et de la réussite scolaire (Gathercole & Alloway, 2004). Cette affirmation reste vraie indépendamment de facteurs plus généraux comme des facteurs socio-économiques (Barrouillet, Camos, Morlaix & Suchaut, 2008) et les connaissances préscolaires (Alloway, Gathercole, Adams, & Willis, 2003). Gathercole,

Pickering, Stegmann et Wright (2004) ont même montré que les compétences dans les tâches de MDT sont d'excellents prédicteurs du score (faible, moyen ou élevé) en anglais et en mathématiques à l'évaluation nationale anglaise pratiquée à 6/7 ans. D'ailleurs, Gathercole et Alloway (2004, 2008), et Gathercole, Lamont et Alloway, (2006) ont découvert que les résultats insuffisants des enfants à l'école sont souvent liés à un déficit de mémoire de travail qui n'a pas été décelé, lequel gêne ces enfants dans la mémorisation et la poursuite des instructions. Par ailleurs, de nombreuses études avaient mis en évidence que les faibles performances en MDT était une caractéristique des enfants ayant des difficultés dans l'acquisition des habiletés langagières et/ou mathématiques (Bull & Scerif, 2001 ; De Jong, 1998 ; Maryinger & Wimmer, 2000 ; Siegel & Ryan, 1989 ; Swanson, 1994 ; Swanson, Ashbaker & Sachse-Lee, 1996).

En fait, la mémoire de travail est à l'œuvre dans de nombreuses activités menées dans les classes. Celles-ci requièrent de l'élève qu'il maintienne l'information en mémoire tout en réalisant une autre activité cognitive. Par exemple, additionner des séries de points présents sur des cartes (trouver combien il y a d'items sur chaque carte et additionner les deux nombres), écrire des phrases dictées (d'autant plus difficile à réaliser si la phrase est longue), ou repérer des rimes à l'intérieur d'un poème lu par l'enseignant (et attendre la fin du poème pour redire les rimes repérées), etc. Les élèves qui ont de faibles capacités en MDT sont souvent très vite dépassés et adoptent des comportements typiques face à la tâche scolaire : ils oublient les instructions, perdent le fil de leur pensée durant les tâches complexes, échouent à mener de front maintien et traitement et éprouvent des difficultés à faire le lien entre les activités en cours et les informations déjà présentes en MLT (Gathercole & Alloway, 2004, 2008 ; Gathercole, Lamont et al., 2008). Ainsi la capacité en mémoire de travail contraint directement l'habileté à construire de nouvelles connaissances et de nouveaux savoir-faire. Ces tâches ne pouvant être menées à bien par ces enfants à faible MDT, ils perdent autant d'occasions d'apprentissage et finissent par prendre du retard par rapport à leurs pairs dans leurs acquisitions scolaires (Gathercole & Alloway, 2008).

Ce serait la capacité générale de la MDT qui serait déterminante et non une difficulté spécifique dans le traitement d'un certain type d'informations, comme par exemple une difficulté à traiter le matériel verbal dans une tâche de lecture (De Jong, 1998). Par exemple,

les tâches complexes de MDT qui combinent maintien et traitement sont de bien meilleurs prédicteurs des capacités en lecture (Siegel & Ryan, 1989) comparativement aux mesures de la MCT phonologique (Engle, Carullo & Collins, 1991 ; Swanson & Howell, 2001 ; Wagner & Muse, 2006 ; Wagner et al., 1997) ou de la conscience phonologique (Swanson, 2003 ; Swanson & Beebe-Frankenberger, 2004). Daneman et Carpenter (1980) ont été les premières à montrer que la MDT est fortement associée aux habiletés linguistiques. Par exemple, elles déterminent une corrélation de .90 entre les performances en empan de lecture et la capacité à relier un pronom au nom auquel il se rapporte. Cette dernière compétence est d'ailleurs fortement en jeu dans la compréhension des phrases et plus encore dans la compréhension de textes. Il n'est pas étonnant alors que les tâches complexes de MDT soient d'excellents prédicteurs de la compréhension en lecture (Cain, Oakill, & Bryant, 2004 ; Daneman et al., 1980) et plus précisément de la compréhension de textes (Yuill, Oakill, & Parkin, 1989). Toujours dans le domaine des habiletés langagières, d'autres études ont montré la relation forte entre MDT et compréhension du langage (King & Just, 1991 ; MacDonald, Just & Carpenter, 1992), fluence verbale (Adams & Gathercole, 1995), acquisition du vocabulaire (Daneman & Green, 1986 ; voir Gathercole, Service, Hitch, Adams & Martin, 1999 pour une étude avec des enfants de 4 ans) ou encore le raisonnement (Barrouillet & Lecas, 1999).

Il existe également un lien très étroit entre mémoire de travail et mathématiques mais il dépend aussi bien de l'âge de l'enfant que de la tâche concernée, le lien étant plus prononcé avec les tâches de MDT verbale, et ce, au début de l'apprentissage. Il a été montré que les enfants ayant des difficultés d'apprentissage en arithmétique ont des performances plus faibles que leurs pairs du même âge dans les tâches de mémoire de travail (Bull, Johnston, & Roy, 1999 ; Bull et al., 2001 ; Geary, Brown & Samaranayake, 1991 ; Gathercole & Pickering, 2000 ; Geary, Hoard & Hamson, 1999 ; McLean & Hitch, 1999). L'impact de la mémoire de travail peut être observé dans des tâches simples qui ne semblent pourtant pas la solliciter. Ainsi, les enfants de 8 ans qui ont de faibles performances en MDT ont plus de difficultés que leurs pairs à écrire des nombres sous dictée (Camos, 2006). De plus, ils éprouvent davantage de difficultés que leurs pairs à retrouver des résultats arithmétiques en mémoire ou sont plus lents à le faire (Barrouillet & Lépine, 2005). Ils utilisent donc plus souvent des stratégies de compensation, plus immatures et plus lentes comme par exemple

le comptage sur les doigts (Geary et al., 2004). La relation entre MDT et arithmétique se retrouve bien entendu dans des activités plus complexes comme la résolution de problèmes à énoncés verbaux (Swanson, Cooney & Brock, 1993 ; Swanson & Sachse-Lee, 2001) laquelle activité regroupe des compétences qui ont elles-mêmes un lien fort avec les capacités en MDT comme la lecture, le raisonnement et la résolution d'opérations arithmétiques. La MDT dans son versant verbal joue donc un rôle crucial dans l'acquisition de l'arithmétique de base, puis, à mesure que l'enfant grandit, d'autres facteurs interviennent comme la connaissance du nombre et les stratégies (Thevenot & Oakhill, 2005).

Ainsi les capacités en MDT sont fortement liées aux capacités d'apprentissage, que ce soit dans le domaine du langage ou dans celui des mathématiques. Ce serait la capacité générale de la MDT qui serait déterminante et qui expliquerait ces liens, c'est-à-dire la capacité à mener de front maintien et traitement. En effet, être dans une situation d'apprentissage dans une classe, nécessite aussi de pouvoir centrer son attention sur les tâches à réaliser, tout en inhibant les nombreux stimuli distracteurs de l'environnement. Il est donc nécessaire, surtout chez le jeune enfant de pouvoir évaluer l'efficacité de la MDT, notamment pour comprendre les désordres éducatifs et développementaux, ou peut-être même les prévenir. Le point suivant présente ainsi les principales méthodes d'évaluation utilisées dans la recherche chez l'enfant.

1.4. Paradigmes d'étude de la mémoire de travail chez le jeune enfant

Les jeunes enfants ne disposent pas des capacités leur permettant de réaliser les tâches de MDT proposées aux enfants plus âgés ou aux adultes comme la tâche de *running span* présentée ci-avant. En effet, ils ne savent pas encore lire ou compter, ils n'ont pas un degré de fluence verbale suffisant, que ce soit pour comprendre les consignes ou pour donner une réponse orale, et ils n'ont ni la motivation ni l'endurance nécessaire pour supporter de longues sessions d'essais. Pour autant, il est indiscutable qu'ils disposent d'une MDT, notamment parce qu'ils sont capables d'avoir des comportements orientés vers des buts, buts qu'il faut maintenir en mémoire durant l'exécution de la tâche. En effet, vers la fin de la première année de vie, les bébés sont capables de résoudre des petits problèmes orientés vers un but (Mosier & Rogoff, 1994 ; Willats, 1984, 1999), communiquer sur les

intentions et leurs désirs en utilisant des gestes ou des « mots » (Bates, Beninni, Bretherton, Camaioni & Volterra, 1979 ; Bruner, 1975 ; Harding & Golinkoff, 1979) et s'engager dans une activité d'attention partagée avec autrui (Bakeman & Adamson, 1984 ; Bates, 1976 ; Seibert, Hogan & Mundy, 1982). L'étude de la MDT chez le jeune enfant est primordiale car elle est nécessaire à l'acquisition des premières compétences des bébés.

1.4.1. Etudes chez le bébé

La littérature rapporte majoritairement deux types d'études chez le bébé. Il y a d'abord les études où on évalue la durée durant laquelle le bébé peut maintenir en mémoire une information comme la position d'un objet ou la nature d'un objet, ensuite celles où on évalue la capacité du bébé à mettre à jour les informations en MDT.

Etudes évaluant la rétention d'une information durant un délai

Dans ces études, on présente d'abord au sujet une information à retenir (emplacement ou identité d'objet), laquelle doit pouvoir être aisément représentée en mémoire par le sujet, par exemple un jouet. Suit un temps durant lequel l'information n'est plus disponible pour le sujet et, durant ce délai imposé, le sujet doit maintenir l'information en mémoire. Finalement, à la fin du délai, le sujet doit accomplir une action qui indique que l'information originale est toujours présente en mémoire. Le premier chercheur à avoir utilisé ce type de méthode est Hunter (1913). Après avoir élaboré ce paradigme et l'avoir éprouvé avec succès auprès d'animaux tels que des rats, des rats laveurs et des chiens, il l'a adapté pour le tester auprès de sa fille de 13 mois (Hunter, 1917). Depuis, ce paradigme nommé tâche de réponse différée (*Delayed-response task*) a été largement utilisé par les chercheurs pour évaluer au cours du développement le délai durant lequel le très jeune enfant peut maintenir une information en mémoire. En effet, c'est un paradigme qui présente les qualités de pouvoir être utilisé sur des enfants sans langage, de se baser sur une aptitude animale ancestrale (i.e., la recherche de nourriture) et d'être de surcroît attrayant pour les enfants car il ressemble à un jeu de cache-cache. Cette tâche a été modifiée de bien des manières pour évaluer les paramètres améliorant ou au contraire affectant le rappel après l'introduction d'un délai. De plus, pour étudier les nourrissons, Bell (1970), et plus récemment Bigelow, MacDonald et MacDonald (1995) ont eu l'idée d'utiliser une tâche d'orientation du regard plutôt qu'une tâche de recherche d'objets. Ainsi, ils remarquèrent

que les nourrissons sont plus efficaces à rechercher du regard leur mère plutôt qu'un jouet. Diamond et Doar (1989) ont, quant à elles, montré que le délai durant lequel les nourrissons peuvent maintenir l'information en mémoire croît linéairement de 2 secondes par mois entre 7 mois et demi et 12 mois, passant d'une rétention de 2 à 12 secondes. Il n'est pas utile de faire une description exhaustive des résultats car il apparaît que les performances évaluées dans les études dépendent aussi bien de la modalité de réponse du sujet (attraper vs regarder le stimulus) que du stimulus présenté (personne/visage vs. jouet). Cependant, on peut dire que les performances de rétention augmentent au cours du développement (voir Pelphrey & Reznick, 2003 pour une revue) et que la première manifestation mesurable de la MDT a été évaluée à 5/6 mois de vie (Diamond, 1985). La tâche de réponse différée permet une mesure claire de la MDT mais ce paradigme ne peut être utilisé qu'avec des bébés. Les études utilisant ce paradigme ont principalement évalué des enfants jusqu'à 24 mois, rarement entre 24 et 36 mois. On comprend bien qu'après cet âge, les délais augmenteraient trop, et peut-être même l'information pourrait-elle être encodée et stockée en MLT.

Certains auteurs ont adapté ce paradigme pour évaluer les compétences de maintien du but de la tâche lorsqu'il est en compétition avec des informations distrayantes. Il s'agit de la tâche A-non-B, tâche utilisée aussi par Piaget (1954) pour évaluer l'émergence du concept d'objet chez l'enfant. Durant cette tâche, l'objet est montré à l'enfant puis caché dans un emplacement (A). Après un délai de rétention, l'enfant peut aller rechercher l'objet. Après qu'il ait réussi à rechercher l'objet en A, on recommence la procédure mais en cachant cette fois l'objet en B. Ainsi cette tâche requiert que l'enfant mette à jour constamment les informations présentes en MDT pour suivre les différentes localisations de l'objet désiré, et qu'en plus, il inhibe les informations relatives aux localisations où l'objet avait été retrouvé précédemment. La littérature rapporte que les performances dans la tâche A-non-B varient considérablement entre 5 à 10 mois. Les bébés ne réussissent la tâche que très médiocrement à 5 mois (Baird et al., 2002 ; Cuevas & Bell, 2010 ; Reznick, Morrow, Goldman, & Snyder, 2004), et la moitié des bébés réussissent la tâche vers 8 mois lorsque le délai est très court entre présentation et recherche (Bell & Fox, 1992 ; Diamond, 1985). Vers 10 mois, la majorité des enfants réussissent la tâche avec un délai court et certains la réussissent même avec un délai plus long (Bell & Cuevas, 2012 ; Diamond, 1985 ; Matthews, Ellis &

Nelson, 1996).

Ainsi, la durée durant laquelle une information peut être conservée en mémoire par le très jeune enfant est un domaine de recherche qui a été très largement exploré. D'autres études tentent de faire une mesure de l'efficacité de la MDT chez le jeune enfant dans des situations plus complexes. Dans ce cas, c'est la quantité d'informations pouvant être maintenue qui est alors évaluée.

Etudes évaluant la mise à jour des informations en mémoire de travail

La première tâche que nous décrivons est la tâche *Self-ordered pointing* (SOP), (Petrides, 1995). Dans cette tâche, l'expérimentateur montre deux images sur une carte et l'enfant doit en choisir une. Une autre carte lui est ensuite montrée avec ces deux mêmes images dans un autre ordre et l'enfant doit montrer celle qu'il n'avait pas encore choisie. Le nombre d'images présentes sur les cartes augmente ensuite et on s'intéresse au nombre maximal d'images présentes sur la carte où l'enfant ne commet pas d'erreur. Cette tâche ne peut pas être administrée à des enfants plus jeunes que 3 ans ou 3 ans et demi car la compréhension de la consigne peut en être difficile. Cette tâche a donc été adaptée pour des jeunes enfants à partir de 15 mois dans la tâche de « chamboulement des tasses » (*box-cup scramble* ; Diamond et al, 1997 ; Hughes, 1998a, 1998b ; McEvoy, Rogers et Pennington, 1993). Cette fois, des récompenses sont cachées sous des pots. L'enfant doit soulever tous les pots tout en se souvenant de ceux qu'il a déjà soulevés pour mener une recherche efficace. Notons qu'un écran cache les pots entre chaque « recherche » de l'enfant. Deux procédures sont possibles. Dans la première procédure, les pots peuvent ne pas se déplacer (*Stationary pots*) ce qui nécessite la mise à jour des informations spatiales des pots déjà retournés et à retourner. Dans la seconde procédure, les pots peuvent être déplacés sous les yeux de l'enfant entre chaque recherche (*Spinning pots*) ce qui implique une mise à jour des informations qui sont maintenues en mémoire, informations concernant l'emplacement des objets non encore découverts. Les variables dépendantes sont les mêmes dans ces deux variantes, c'est-à-dire le nombre d'essais nécessaires pour retourner tous les pots et le nombre d'essais où l'enfant retourne un pot qui l'avait déjà été. Dans une étude longitudinale, Diamond et al. (1997) ont montré qu'il y avait une amélioration des performances dans une tâche comptant 6 pots de 3 ans 6 mois à 7 ans. De la même manière,

Ribordy, Jabès, Banta-Lavenex et Lavenex (2013) ont montré une amélioration significative des performances des enfants avant et après 42 mois dans leur tâche originale évaluant la mémoire spatiale allocentrique. Cette tâche, créée par les auteurs (Banta Lavenex & Lavenex, 2009) a été préalablement testée auprès de rats (Lavenex & Schenk, 1995, 1997, 1998) d'écureuils (Lavenex, Shifflet, Lee & Jacobs, 1998) de singes (Banta Lavenex, et al., 2006 ; Lavenex & Banta Lavenex, 2006 ; Lavenex, Banta Lavenex & Amaral, 2007) et même d'adultes humains ayant une lésion au niveau de l'hippocampe (Banta Lavenex et Lavenex, 2010 ; données non publiées). Dans cette tâche de mémoire spatiale, les enfants entrent dans un espace carré, délimité verticalement par des draps blancs, afin d'éviter toute prise d'information visuelle sur l'environnement. Ils doivent retrouver parmi des assiettes recouvertes de pots des récompenses cachées. Les récompenses sont toujours placées dans les mêmes assiettes et les auteurs évaluent alors la capacité des enfants à localiser les récompenses en prenant en considération la position des assiettes les unes par rapport aux autres. Les enfants doivent en effet construire leur propres repères par rapport à la disposition des objets et aux objets proches puisqu'ils ne peuvent pas se fier à des repères visuels de l'environnement ni à des repères égocentriques, l'entrée dans l'espace expérimental changeant au cours des essais. Les essais comportent soit des pots rouges qui indiquent la localisation des récompenses, soit uniquement des pots blancs pour ne donner aucun indice sur la localisation des récompenses. Avant 24 mois, les enfants ne peuvent retrouver une récompense parmi 4 localisations possibles, dans les essais où aucun indice n'est donné sur l'emplacement des récompenses, alors que les enfants de plus de 25 mois réussissent à construire une représentation allocentrique de l'environnement et réussissent la tâche. De même, dans une tâche comptant 3 récompenses parmi 18 localisations, les enfants avant 43 mois ne réussissent la tâche que dans les essais indicés, alors qu'à 43 mois, ils réussissent à localiser les récompenses que leur emplacement soit indicé ou non, montrant par-là leurs capacités à construire des repères spatiaux mais aussi à mémoriser trois emplacements.

Enfin dans la tâche de *Self Ordered Pointing*, les enfants deviennent de plus en plus performants entre 3 et 5 ans et sont capables de maintenir et manipuler un grand nombre d'items (de 4/5 à 6/7 items ; Hongwanishkul, Happaney, Lee et Zelazo, 2005). Cependant, en lisant ces derniers résultats, on peut se poser la question de savoir ce que ces tâches

évaluent réellement. Est-ce la capacité de la MDT en tant que telle qui est évaluée ? Dans ce cas, on sera étonné de voir que les enfants de 5 ans ont des performances proches de celles des adultes telles qu'évaluées par Miller (1956). La tâche de *Self Ordered Pointing* n'évaluerait-elle pas plutôt, comme la tâche de violation des attentes (Reznick, 2009), la mémoire implicite (Graf & Masson, 1993) ? Ou bien les items plusieurs fois montrés ne seraient-ils pas encodés et stockés en MLT ? En tout état de cause, ces tâches ne permettent pas d'avoir des indices sur le fonctionnement intrinsèque de la MDT.

Ainsi, les paradigmes qui sont utilisables chez les bébés évaluent principalement la capacité de la MDT sous son versant temporel en donnant une estimation du délai de rétention de l'information. Cependant, elles ne sont pas utilisables avec des enfants plus âgés. D'autre part, les paradigmes qui sont utilisables avec les enfants plus âgés que 2 ans ne permettent pas d'analyser le fonctionnement de la mémoire de travail mais fournissent uniquement une preuve de l'amélioration des performances avec le développement.

1.4.2. Etudes chez les enfants d'âge scolaire.

La MDT a largement été étudiée chez l'enfant à partir de paradigmes inventés pour évaluer les adultes, la procédure étant plus ou moins adaptée en fonction de l'âge de l'enfant. L'idée est de concevoir des tâches alliant stockage et traitement de l'information. Daneman et Carpenter (1980) ont été les premières à proposer une tâche d'évaluation de la MDT, la tâche d'empan de lecture (*reading span*, Figure 1.1). Le sujet lit à voix haute une série de phrases sans lien entre elles et doit retenir à chaque fois le dernier mot de la phrase. A la fin de chaque phrase, le sujet doit décider si la phrase est vraie ou fausse avant de lire la phrase suivante, ce qui permet que le traitement réalisé sur la phrase soit maximal puisqu'il faut en analyser le contenu pour répondre. Le nombre de phrases présentées par série est augmenté jusqu'à ce que le sujet échoue à rappeler l'ensemble des derniers mots lus. L'empan en lecture est calculé comme le nombre maximal de derniers mots que le sujet peut rappeler, et ce, dans l'ordre de leur présentation. Si ce paradigme est utilisé chez les enfants, l'impact des compétences en lecture peut biaiser les résultats, notamment chez ceux dont le déchiffrage est encore coûteux, c'est-à-dire chez les plus jeunes (6 à 8 ans). C'est pourquoi les auteurs préfèrent généralement utiliser la tâche d'empan d'écoute (*listening span*) pour évaluer les enfants (Daneman & Carpenter, 1980). Dans cette tâche, le

déroulement est le même sauf que le sujet doit écouter l'expérimentateur lire les phrases plutôt que de les lire lui-même. Cette dernière tâche semble peu facilement utilisable avec de jeunes enfants car le matériel n'est qu'oral et que la compréhension de la consigne elle-même peut poser problème : qu'est-ce que « le dernier mot de la phrase » pour un jeune enfant qui ne sait pas toujours isoler consciemment un mot dans une phrase orale ?

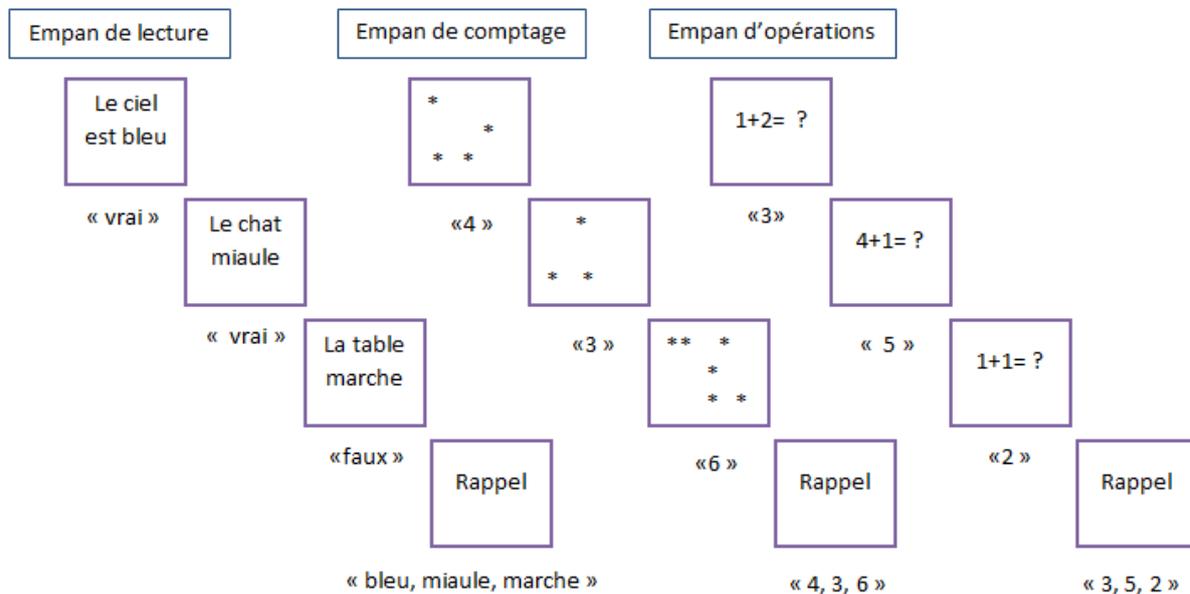


Figure 1.1 : Trois exemples de tâches d'empan complexe pour une série de longueur 3

Une autre tâche traditionnellement utilisée avec les enfants est l'empan de comptage (*counting span* ; Case, Kurland & Goldberg, 1982). Le sujet doit dénombrer successivement plusieurs ensembles de points en mémorisant à chaque fois le résultat du dénombrement, puis, au signal, rappeler le cardinal de chaque collection de points et ce, dans l'ordre de présentation (Figure 1.1). L'empan correspond au nombre maximal d'ensembles dont le sujet peut rappeler le cardinal, dans l'ordre de présentation. Là encore, c'est une tâche qui ne peut être utilisée avec les jeunes enfants. En effet, si le dénombrement est très tôt accessible aux enfants, il met du temps à s'automatiser et à devenir performant, notamment en ce qui concerne la coordination entre le geste et l'énonciation de la chaîne numérique, laquelle ne pose plus de difficulté à 6 ans révolus seulement (Camos et al., 1999, 2001). Enfin, la tâche d'empan d'opérations (*operating span*) est parfois utilisée avec les enfants (Turner & Engle, 1989). Cette tâche reprend la procédure précédente mais le traitement

consiste cette fois à réaliser des opérations très simples (exemple : $1+1 = ?$) et le sujet doit mémoriser la somme de chaque opération. L'empan est le nombre maximal de sommes pouvant être rappelées, dans l'ordre de présentation (Figure 1.1).

Toutes ces tâches ont été déclinées avec de nombreuses variantes mais il est évident qu'elles ne peuvent être utilisées avec de jeunes enfants, puisque ces tâches font appel à des compétences qu'ils ne maîtrisent pas (e.g. lecture, calcul arithmétique) ou très peu (e.g. dénombrement, déplacement mental dans la chaîne numérique). Par exemple, la tâche d'empan de comptage est d'une difficulté extrême à 5 ans et les sujets ne peuvent rappeler plus de 1.8 items en moyenne (Halford, Maybery, O'Hare & Grant, 1994 ; Case et al., 1982). De la même manière, les tâches d'empan d'écoute sont très difficiles même pour les enfants de 8 ans (empan de 1.8 évalué par Cowan et al., 2005) et donc inexploitable avec les enfants d'âge préscolaire.

D'autres tâches d'empan, plus simples, sont utilisées pour évaluer la capacité de stockage à court terme chez les enfants d'âge scolaire. Certains auteurs ont tenté d'utiliser ce type de tâche avec de jeunes enfants. Ainsi, Gathercole et Adams (1993) ont proposé des tâches de rappel de mots, de non-mots et de chiffres à des enfants de 2 et 3 ans, ainsi que d'autres tâches évaluant des aspects plus généraux de la cognition. Les auteurs concluent qu'il est possible d'évaluer d'aussi jeunes enfants avec des tâches classiques. Cependant, on note au moment de la présentation des résultats que plus de la moitié des sujets de l'échantillon initial ont été finalement éliminés car ils n'avaient pas complété l'ensemble des tâches proposées. Ainsi, ces tâches trop abstraites ne permettent pas d'évaluer les enfants tout-venants, mais peut-être uniquement une certaine catégorie d'enfants, certainement ceux qui sont le plus en avance au niveau développemental. D'autre part, ces tâches ne permettent de réaliser qu'une seule évaluation de la capacité de mémorisation et de rappel de l'information mais ne permettent pas d'étudier précisément les mécanismes qui sous-tendent le fonctionnement de la mémoire de l'enfant.

Ainsi, les tâches utilisées jusqu'à 2-3 ans (tâche de réponse différée, A-non-B, SOP) ne sont plus utilisables avec des enfants plus grands parce qu'elles deviennent trop faciles (effet plafond) ou trop fastidieuses. Ces études se focalisent surtout sur le délai durant lequel l'information peut être maintenue en MDT, délai qui augmente drastiquement au cours du

développement. D'autre part, les enfants entre 2 et 6 ans n'ont pas encore les compétences nécessaires pour réaliser les tâches destinées aux enfants à partir de 7 ans car elles nécessitent des habiletés que les jeunes enfants ne maîtrisent pas. Ces derniers paradigmes évaluent essentiellement la capacité de la MDT sous l'aspect de la quantité d'informations pouvant être stockée. Il n'existe donc pas, à ce jour, de paradigme pouvant être administré à chacun des groupes d'âges compris entre 2 et 6 ans, ou en tous les cas, pas de paradigme paraissant satisfaisant pour étudier précisément le fonctionnement de la MDT chez le jeune enfant.

Le premier objectif de cette thèse était donc l'élaboration d'un paradigme qui soit utilisable avec l'ensemble des enfants entre 2 et 6 ans. Pour cela, ce paradigme se devait d'être simple, pour que les très jeunes enfants en comprennent la consigne et le but, concret pour qu'ils s'y intéressent et l'investissent, et sensible pour permettre une évaluation fine du fonctionnement de la MDT.

1.4.3. Un paradigme valable pour les 2-6 ans.

Ainsi, il n'existe que très peu de paradigmes pouvant être utilisés avec les enfants entre 2 et 6 ans. D'ailleurs, la revue de littérature sur la capacité de la mémoire de travail de Simmering et Perone (2013), ne recense que 4 études portant sur des échantillons d'enfants à partir de 3 ans. Ces études ne portent d'ailleurs que sur des tâches d'empan simple opérées sur du matériel verbal. Le faible nombre d'études réalisées auprès des enfants entre 2 et 6 ans, s'il peut s'expliquer par l'inexistence de paradigmes adaptés à l'ensemble de cette tranche d'âge, peut aussi s'expliquer par le fait que la majeure partie des études étant réalisées dans les pays anglo-saxons, il était difficile pour les auteurs d'avoir facilement accès à un « vivier » de sujets. Les expériences citées comptent donc un nombre restreint de sujets (parfois pas plus de 10 par niveau d'âge). C'est pourquoi, pouvant nous appuyer en France sur le fait que plus de 95% des enfants sont scolarisés à partir de 3 ans à l'école maternelle (source I.N.S.E.E.), nous avons dans un premier temps créé un paradigme original pour étudier la tranche d'âge des 4-6 ans. Ce travail a été le point de départ des autres expériences menées dans cette thèse, lesquelles ont permis d'explorer le fonctionnement de la mémoire de travail chez le jeune enfant, auprès d'un échantillon large, soit environ 470 enfants entre 2 ans et demi et 6 ans.

Pour concevoir notre paradigme, nous avons voulu mettre les sujets dans une situation où ils étaient cognitivement et physiquement actifs pour maintenir leur attention sur le but de la tâche à accomplir. Nous rejoignons dans cette conception de tâche Reznick (2009) qui défendait l'idée qu'une des procédures les plus prometteuses pour créer un nouveau paradigme utilisable avec les très jeunes enfants étaient de les mettre en activité dans une tâche de type observation-réalisation. Dans ce type de tâche, une séquence d'actions est montrée au sujet et celui-ci doit la reproduire après un délai imposé. Alp (1994) a ainsi réalisé un tri d'objets disparates dans deux boîtes devant les enfants. Ceux-ci devaient ensuite reproduire le tri, les objets étant plus nombreux au fil des essais, ce qui était réussi par des enfants à partir de 3 ans. Ce type de tâche paraît effectivement plus adapté que celles présentées ci-avant car les jeunes enfants ont des capacités d'attention limitées et il semble primordial pour maintenir leur attention de les rendre actifs durant la passation. D'autre part, pour motiver les jeunes enfants, une tâche représentant une situation concrète et bien connue d'eux, avec des objets bien réels à manipuler, devait apporter une meilleure adhésion des sujets et donc une plus grande implication. Ainsi, il a été proposé aux enfants de « faire les courses comme maman » en empilant des fruits en plastique dans un sac transparent à l'identique du modèle réalisé sous leurs yeux par l'expérimentateur. En introduisant un délai entre la présentation du modèle et la réalisation par l'enfant à l'identique du paradigme de Brown-Peterson (Brown, 1958 ; Peterson & Peterson, 1959), cette tâche a la particularité de pouvoir se faire rejoindre les deux courants de recherche cités précédemment, celui évaluant la durée de rétention et celui évaluant la capacité de stockage de la MDT. D'autre part, ce nouveau paradigme, au-delà d'une simple évaluation, devait permettre une meilleure compréhension du fonctionnement de la MDT chez le jeune enfant. Aussi, le chapitre suivant présente les trois modèles de MDT qui semblent être les plus pertinents actuellement pour rendre compte du fonctionnement de la MDT. Ensuite, les caractéristiques intrinsèques de la MDT mises en évidence par ces modèles seront plus particulièrement décrites. A partir de cela, il sera aisé de comprendre le choix des facteurs manipulés au travers des six expériences rapportés dans ce travail de thèse.

2. Le fonctionnement de la mémoire de travail

Il existe deux courants principaux dans l'étude de la MDT : le courant spécifique et le courant général. Le courant spécifique suppose l'existence de mécanismes de maintien spécifiques aux propriétés du matériel à mémoriser (matériel verbal vs. visuo-spatial), chaque mécanisme bénéficiant d'un pool de ressources qui lui est propre. Parce qu'il a été le premier modèle de MDT à avoir été proposé et parce qu'il fait toujours référence en la matière, le modèle à Composantes Multiples de Baddeley (1986), appartenant à ce premier courant, sera décrit en premier lieu. Le courant général suppose quant à lui qu'il existe un pool commun de ressources qui se partage entre traitement et stockage des informations. Ce mécanisme de maintien attentionnel général est indépendant des propriétés du matériel à mémoriser. Ainsi, le modèle des Processus Emboîtés de Cowan (1988, 1995, 1999, 2001) puis le modèle du Partage Temporel des Ressources (Barrouillet, Bernardin, Camos, 2004) seront présentés pour illustrer le courant général.

2.1. Des modèles de mémoire de travail

2.1.1. Le modèle à Composantes Multiples

Le modèle à Composantes Multiples de Baddeley (1986) est le premier modèle visant à rendre compte de ce qu'est la mémoire de travail. Il est à l'origine de la prise de conscience de l'importance de la mémoire de travail dans les activités cognitives complexes. Dans ce modèle, la MDT est constituée d'un administrateur central (nommé aussi centre exécutif) et de deux sous-systèmes de stockage, la boucle phonologique et le calepin visuo-spatial (Figure 2.1). La boucle phonologique est en charge du maintien des informations verbales, alors que le calepin visuo-spatial est en charge du maintien des informations visuelles et spatiales. Selon Baddeley et Logie (1999), chacun de ces sous-systèmes aurait à sa disposition sa propre quantité, limitée, de ressources pour maintenir l'information en mémoire. Dans ces deux lieux de stockage, les informations seraient maintenues actives sans effort mais le stockage serait limité dans le temps. Ainsi, les traces mémorielles déclinent au travers du temps jusqu'à devenir inaccessibles si rien n'est fait pour les réactiver. Selon Baddeley, les traces mémorielles disparaîtraient au bout de 2 secondes mais pourraient être rafraichies avant leur déclin total. Le rafraichissement des traces mémorielles verbales se

ferait via un mécanisme de répétition subvocale (*rehearsal*) alors que les traces mémorielles de type visuo-spatial seraient réactivées via ce que Logie (1995) nomme un scribe intérieur (*inner scribe*). Ces deux sous-systèmes sont aussi nommés systèmes esclaves car ils sont sous le contrôle de l'administrateur central qui les coordonne et supervise l'intégration des différentes informations. Le centre exécutif quant à lui déploie et gère les stratégies de maintien et de rappel des informations. Il contrôle le flux d'informations présentes en MDT et le rappel des informations provenant de la MLT. Il contrôle aussi l'action, la planification et la programmation des activités cognitives se déroulant de manière concomitante (Baddeley, 1986, 1996 ; Baddeley, Emslie, Kolodny & Duncan, 1998 ; Baddeley & Hitch, 1974). Notons que toutes les fonctions de l'administrateur central sont en lien avec l'attention, laquelle est nécessaire dans le tri d'informations par l'activation des informations pertinentes et l'inhibition des informations non pertinentes. Ainsi, selon Pennington (1994, 1997), le centre exécutif est la MDT en elle-même alors que les sous-systèmes sont des lieux de stockage passif.



Figure 2.1 : le modèle à Composantes Multiples de Baddeley (1986)

Ce modèle est congruent avec de nombreux résultats de recherches auprès d'enfants et d'adultes (Alloway, Gathercole, Willis & Adams, 2004 ; Bayliss, Jarrold, Baddeley & Gun 2003), mais aussi de patients cérébrolésés (Baddeley, 1996 ; Jonides, Lacey & Nee, 2005 pour une revue). De même, les études en neuro-imagerie confirment cette distinction en révélant que différentes aires neuronales sont activées pour le stockage verbal d'une part (hémisphère gauche principalement), et le stockage des informations visuo-spatiales d'autre part (hémisphère droit principalement, Smith & Jonides, 1997 ; Smith, Jonides & Koeppel, 1996) et enfin les processus du centre exécutif (cortex préfrontal dorso-latéral, D'Esposito et al., 1995 ; Smith & Jonides, 1997). Enfin, on notera que, si les systèmes esclaves sont limités dans le nombre d'informations qu'ils peuvent stocker (limite spatiale) ainsi que par le temps durant lequel ils peuvent les stocker avant qu'elles ne soient irrécupérables du fait du déclin

temporel (limite temporelle), le centre exécutif est, lui, limité énergétiquement, c'est-à-dire par la quantité d'attention disponible chez le sujet pour accomplir les tâches.

2.1.2. Le modèle des Processus Emboîtés

Dans le modèle précédent, la MDT était vue comme un système spécifique, indépendant de la MLT. Au contraire, Cowan (1999) considère que la MDT est composée de l'ensemble des informations suffisamment activées pour être utilisées dans les actions en cours (i.e., le stockage) et des mécanismes permettant de maintenir cet état (i.e., le traitement). Ainsi la MDT représenterait-elle une sous-partie de la MLT composée d'informations activées à un moment précis (Figure 2.2).

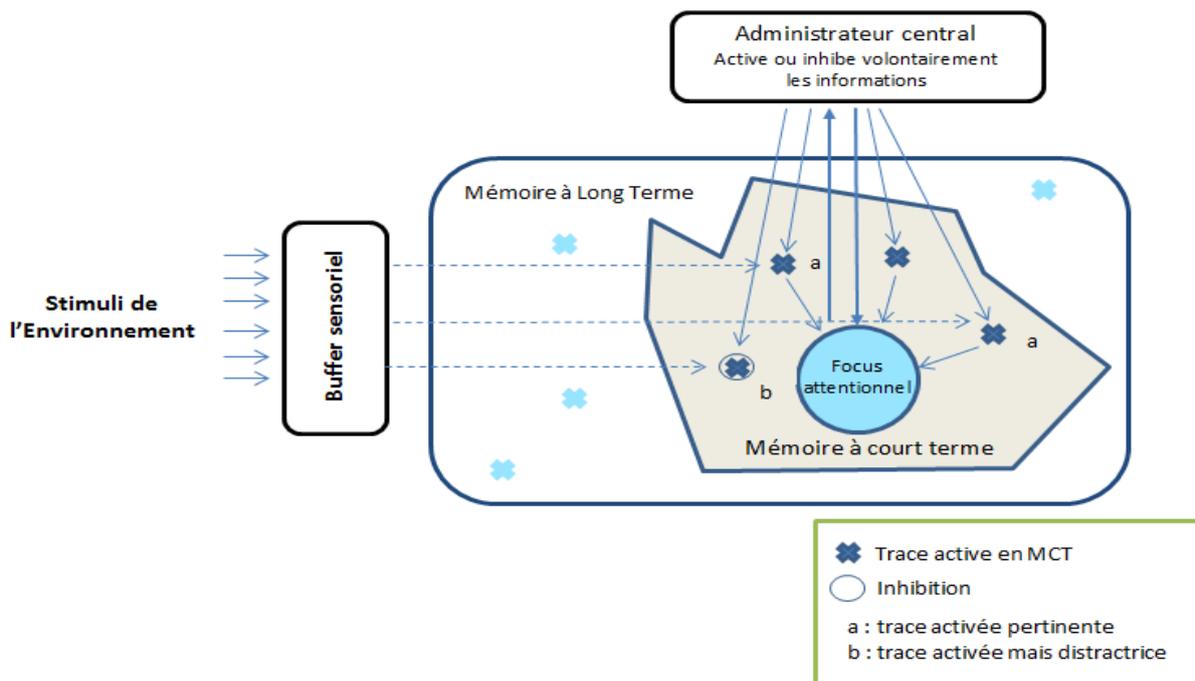


Figure 2.2 : Le modèle des Processus Emboîtés de Cowan (1999)

Toutefois, les informations peuvent être activées selon deux sources. Premièrement, elles peuvent être activées du fait que l'attention va se porter sur des éléments précis, par la focalisation consciente et cognitivement coûteuse exercée par l'administrateur central. Il s'agit dans ce cas des traces activées dans le focus attentionnel (i.e., dans la zone bleue de la Figure 2.2). Deuxièmement, les informations peuvent être automatiquement activées, via le buffer sensoriel, comme une intrusion de l'environnement extérieur (bruit, perturbation visuelle...). Il s'agit cette fois des traces activées en MCT (i.e., dans la Figure 2.2, traces dans la zone grise). En fait, l'allocation de l'attention est contrôlée conjointement par ces deux

processus, automatique et contrôlé.

Cette définition fonctionnelle de la MDT rend compte des résultats observés lors des écoutes dichotiques. Dans ces études, les sujets, bien qu'ils ne retiennent pas ou très peu ce qui est entendu dans l'oreille « à ignorer » repèrent des changements brutaux dans les propriétés physiques du message ou encore la présentation de leur prénom dans le message distracteur (Moray, 1959). Pour Cowan, cela signifie qu'une partie de l'attention erre et capte le canal qui est censé être ignoré (Conway, Cowan, & Bunting, 2001). Ainsi la théorie de Cowan incorpore spécifiquement l'inhibition comme un élément de la MDT en incluant le contrôle attentionnel comme un aspect à part entière de la MDT. L'attention peut en effet être dirigée spécifiquement sur des éléments pertinents pour la tâche à accomplir selon les buts fixés en MDT. Mais l'attention peut aussi inhiber, ou tenter de le faire, les éléments non pertinents qui s'introduisent automatiquement dans le système. Outre la limite attentionnelle que l'on entrevoit ainsi, Cowan décrit la MDT comme limitée selon deux aspects principaux. Le premier est le nombre d'items que chacun peut activer à un moment donné. Le second est le temps durant lequel chaque item peut être activé. Ainsi, un nombre limité d'items pourraient être maintenus actifs en MDT durant un temps, lui aussi, limité. Ces limites sont d'autant plus importantes à prendre en considération que le contexte est défavorable (Cowan, 1999) ce qui est le cas chez les enfants qui ont, notamment, des capacités attentionnelles limitées.

2.1.3. Le modèle du Partage Temporel des Ressources

Le modèle de Partage Temporel des Ressources (Time-Based Resource-Sharing model, TBRS) a été proposé par Barrouillet, Bernardin et Camos (2004). Deux postulats principaux permettent d'en comprendre l'essence. Le premier est que l'attention est une ressource limitée qui se partage entre maintien et traitement et le deuxième est que l'attention ne peut se diriger dans le même temps sur le maintien et le traitement. En effet, l'attention ne peut être focalisée que sur un seul élément à la fois (Garavan, 1998 ; Oberauer, 2002, 2005) et se porte donc alternativement sur maintien puis sur traitement, ou inversement. Il en découle deux conséquences.

La première conséquence est que, quand l'attention est dévolue au traitement, les items à maintenir ne reçoivent plus d'activation. Les traces mémorielles déclinent donc peu

à peu avec le temps, jusqu'à devenir irrécupérables si leur niveau d'activation devient trop faible. Par contre, si l'attention se focalise à nouveau sur les traces mémorielles avant que leur niveau d'activation ne soit trop faible, alors ces mêmes traces sont réactivées en mémoire.

La deuxième conséquence est que l'attention s'oriente séquentiellement sur maintien et traitement. C'est-à-dire que l'attention ne peut se porter à la fois que sur maintien ou traitement. L'idée d'une alternance de la focalisation attentionnelle entre maintien et traitement avait déjà été avancée par Towse et Hitch (1995) pour expliquer l'augmentation développementale de l'empan dans une tâche d'empan de comptage. Dans leur modèle du *Task-Switching*, l'attention se focaliserait sur les items à maintenir (e.g., les cardinaux des collections dénombrées) une fois le traitement achevé (e.g., dernier comptage de la série). Les enfants plus âgés, plus experts en comptage, dénombreraient plus rapidement que les plus jeunes les collections de points. Leur traitement serait donc plus rapide que les plus jeunes. Ils pourraient ainsi récupérer les items à rappeler bien avant les enfants plus jeunes. Ces items auraient donc moins perdu d'activation et seraient plus aisément récupérables. Ceci expliquerait l'augmentation développementale de l'empan dans la tâche d'empan de comptage. Mais le *switching* attentionnel proposé dans le modèle TBRS est bien différent de celui de Towse, Hitch et Hutton (1998). En effet, Barrouillet et al. (2004) considèrent qu'il est très rare qu'une tâche capture entièrement l'attention. De ce fait, l'attention pourrait alterner entre maintien et traitement, et ce subrepticement, au cours même de l'épisode de traitement de l'information, permettant le rafraîchissement attentionnel des traces, avant de se focaliser à nouveau sur le traitement de l'information.

Le modèle TBRS considère donc l'attention comme une ressource générale qui se partage successivement entre maintien et traitement. Lorsque l'attention est focalisée sur le traitement, les traces mémorielles voient leur activation diminuer progressivement avec le temps. Dans cette optique, la MDT serait limitée par trois paramètres : la quantité d'attention disponible chez le sujet, le déclin temporel des traces quand l'attention est dirigée vers le traitement de l'information, et l'efficacité du mécanisme de réactivation des traces au travers du *switching* attentionnel (Barrouillet et al., 2004).

Ainsi, si l'on fait une synthèse des modèles présentés ici, on s'aperçoit que

globalement la MDT a 3 principales limites : spatiale, énergétique et temporelle. Afin de mieux comprendre les fondements des expériences réalisées dans cette thèse et le choix des facteurs manipulés, il est nécessaire de cerner plus précisément les limites de la MDT.

2.2. Les limites en mémoire de travail

Premièrement, la MDT est limitée spatialement, c'est à dire par le nombre d'items qu'elle peut activer de manière concomitante. Dans le modèle de Baddeley (1986), cette limite fait référence à la capacité de stockage des sous-systèmes esclaves, alors que chez Cowan (1999), il s'agirait plutôt du nombre maximal de traces mémorielles que l'attention pourrait activer simultanément. Pour Barrouillet et al. (2004)., la limite spatiale concerne le nombre maximal d'éléments qui peuvent être actifs dans le même temps, le focus attentionnel ne pouvant porter que sur un seul item à la fois. La limite spatiale renvoie donc au nombre de traces dont le niveau d'activation est suffisant pour que les traces puissent être récupérées à un instant t. Comme cela a été précisé auparavant, le domaine de recherche visant à évaluer la capacité spatiale de la MDT a été et est encore très largement exploré. Alors que Miller (1956) avait évalué la capacité de stockage chez l'adulte à 7 plus ou moins 2 items, Cowan (2001) défend l'idée que seuls 4 éléments pourraient être maintenus. Dans une revue de la littérature sur le sujet, Simmering et Perone (2013) notent que la capacité évaluée de la mémoire de travail au cours de l'enfance change en fonction des études, c'est-à-dire en fonction des paradigmes, mais aussi du matériel à stocker et manipuler. Par exemple, Case, Kurland et Goldberg (1982) évaluent le rappel de mots à 4.5 à 5 ans, alors que DeMarie et Ferron (2003) évaluent par une tâche d'empan de mots le rappel à 3.2 mots au même âge. Cependant, si les résultats sont peu comparables d'une étude à l'autre, une constante émerge de toutes ces études : les capacités évaluées en MDT augmentent avec l'âge dans quasiment toutes les études rapportées. Les recherches de cette thèse ne portent pas sur la capacité en MDT des jeunes enfants en tant que telle car bien d'autres chercheurs ont déjà exploré ce domaine de recherche. Par contre, une mesure d'empan, c'est-à-dire un indice de la capacité de stockage, a été utilisée pour évaluer l'effet de la manipulation des facteurs sur les performances de rappel, comme nous allons le voir plus avant.

Deuxièmement, la MDT est temporellement limitée du fait du déclin temporel lequel

s'exerce sur les traces mémorielles qui sont en dehors du champ de l'attention. Le déclin temporel est défini comme un déclin inexorable de la force des traces mémorielles au fil du temps, conduisant à des chances de plus en plus limitées de rappel correct, à mesure que le temps ne s'écoule (Anderson & Lebiere, 1998 ; Baddeley, 1986 ; Page & Norris, 1998). Le déclin temporel sera étudié tout au long de la recherche relatée dans cette thèse car le fait d'étudier des jeunes enfants nous donne une bonne opportunité encore jamais exploitée. En effet, les recherches menées traditionnellement sur le déclin en mémoire de travail utilisent des tâches de traitement qui sont concurrentes au maintien afin de bloquer les mécanismes de rafraîchissement des traces mémorielles. Comme cela a été expliqué précédemment, et ce pour chacun des trois modèles, lorsque l'attention n'est plus dirigée vers les traces mémorielles des items à maintenir, alors leur niveau d'activation s'amenuise. Si le niveau d'activation devient trop faible, les traces mémorielles sont perdues et ne peuvent plus être récupérées. Donc, pour observer s'il y a déclin temporel, il est nécessaire d'orienter totalement l'attention vers le traitement à réaliser. Or, il est très difficile de contrôler si les sujets n'alternent pas entre stockage et traitement de l'information pour réactiver les traces durant le traitement même. Ainsi, les résultats des recherches sont souvent contradictoires, certains auteurs réussissant à montrer que le déclin temporel existe (Baddeley, Thomson & Buchanan, 1975 ; Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004 ; Mueller, Seymour, Kieras & Meyer, 2003 ; Barrouillet, Portrat, Vergauwe, Diependaele & Camos, 2011) alors que d'autres continuent à nier son existence (Lewandowsky, Duncan & Brown, 2004, expérience 2 ; Oberauer & Lewandowsky, 2008). Cependant, le fait d'étudier des jeunes enfants permet de pallier à ces problèmes méthodologiques qui excluent actuellement de conclure sur l'existence ou l'absence de déclin temporel.

Pour ce faire, il faut se référer à l'étude réalisée par Camos et Barrouillet (2011) dans laquelle les auteurs ont fait varier orthogonalement deux facteurs, la durée durant laquelle les items doivent être maintenus d'une part et la charge cognitive de la tâche concurrente d'autre part. Les résultats révèlent ainsi que seul un facteur détermine les performances mais qu'il change avec le développement. A 6 ans, les performances sont déterminées par la durée de maintien alors qu'à 7 ans, la charge cognitive de la tâche concurrente est le facteur déterminant. Ainsi, les auteurs en concluent-ils que le maintien est passif avant 7 ans, c'est-à-dire que les enfants avant 7 ans ne vont pas profiter du temps disponible à l'intérieur

de l'épisode de traitement pour switcher leur attention intentionnellement vers le maintien et rafraîchir les traces mémorielles. Il en résulte que les traces mémorielles déclinent avec le temps. Ainsi, pour étudier le déclin temporel avant 7 ans, il n'est nul besoin de proposer une tâche concurrente. Il suffit d'observer l'évolution de l'empan avec le temps puisque le jeune enfant n'utilise pas spontanément de stratégie de maintien des informations, tout du moins si l'hypothèse de Camos et Barrouillet (2011) est correcte.

Ainsi, le deuxième objectif de la thèse était d'étudier au travers des 6 expériences relatées dans cette thèse, mais plus précisément encore au travers des expériences du deuxième chapitre de la partie expérimentale, le déclin temporel des traces mémorielles chez le jeune enfant entre 2 et 6 ans. Un objectif secondaire était aussi d'éprouver les résultats de Camos et Barrouillet (2011) auprès des jeunes enfants.

Troisièmement, la MDT est limitée énergétiquement, c'est-à-dire par l'énergie attentionnelle que le sujet peut déployer dans le maintien et le traitement de l'information. Ceci est particulièrement intéressant dans l'étude des jeunes enfants car ceux-ci ont des capacités attentionnelles limitées, lesquelles capacités augmentent durant la petite enfance, notamment du fait de la maturation et de la spécialisation neuronale. Les jeunes enfants peuvent avoir des difficultés à inhiber les informations non pertinentes, mais aussi à conserver en mémoire le but de l'activité à réaliser. L'étude des aspects attentionnels chez les jeunes enfants sera le deuxième champ d'étude exploré par cette thèse. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux facteurs qui peuvent aider le jeune enfant à améliorer son contrôle attentionnel. Etant donné l'aspect primordial que revêt le contrôle attentionnel, et ce dans les trois modèles présentés, le dernier chapitre de la partie théorique lui sera entièrement consacré. Ceci permettra d'éclairer le choix des facteurs que nous avons fait varier pour tenter d'améliorer le contrôle attentionnel de l'enfant par des modifications de notre tâche.

En résumé, la capacité de stockage, le temps et l'attention limitent la capacité même de la MDT et donc aussi son efficacité. Cela influence le développement cognitif de nombreuses manières allant de l'acquisition des catégories de base durant l'enfance (Oakes, Horst, Kovack-Lesh, Perone, 2008) aux compétences de haut niveau telles que suivre des instructions multiples (Gathercole, Durling, Evans, Jeffcock & Stone, 2008). Cependant, il est

clairement établi que les capacités et l'efficacité de la MDT augmentent avec le développement. De nombreux facteurs ont été évoqués dans la littérature pour expliquer ce développement et ils évoquent tous le passage d'un niveau de fonctionnement global, diffus, à un fonctionnement de plus en plus focalisé et spécialisé, que l'on s'intéresse au fonctionnement neuronal même ou aux processus cognitifs mis en œuvre.

3. Les facteurs liés au développement de la mémoire de travail

Pour expliquer l'augmentation de la capacité en MDT, certains auteurs argumentent que ce sont les ressources mentales qui augmentent avec le développement alors que d'autres défendent l'idée que c'est la manière dont elles sont utilisées qui change au cours du développement. Ainsi, Pascual-Leone (1970) explique que les ressources mentales ou pouvoir mental (M-space ou M-power) augmentent au cours du développement permettant ainsi de stocker de plus en plus d'informations. Towse et Hitch (2007) quant à eux proposent que l'augmentation développementale de la capacité de MDT s'opère à partir d'améliorations dans des processus cognitifs autres que la simple capacité en mémoire de travail. Ainsi, l'amélioration de la vitesse de traitement, de l'attention, de la qualité de l'encodage, de la sélection et la génération de la réponse et/ou du rappel, seraient à l'origine de l'augmentation des performances dans les tâches de MDT. Dempster (1981) avait d'ailleurs isolé 10 facteurs, autres que la capacité intrinsèque de la MDT, pouvant expliquer les différences interindividuelles et développementales. Il les avait classé en deux catégories, les facteurs stratégiques d'une part (i.e., répétition subvocale, groupement des informations en chunks), et non-stratégiques d'autre part (i.e., vitesse de traitement, résistance à l'interférence).

Cependant, quel que soit le point de vue que l'on adopte, c'est bien la maturation neuronale qui sous-tend toutes les améliorations puisqu'elle apporte une vitesse de conductivité neuronale accrue et une spécialisation des structures neuronales, mais qu'elle permet aussi de réduire les interférences grâce au renforcement de l'isolation des fibres nerveuses. Ainsi, puisque chez le très jeune enfant le développement neuronal est au cœur du développement de la MDT en particulier, et de la cognition en général, il sera détaillé en premier dans ce chapitre.

3.1. Développement neuronal et spécialisations neuronales

Déjà en 1895, Baldwin défendait l'idée que la capacité à traiter un nombre croissant d'informations ou de concepts à un moment donné, ce qu'il nommait « l'empan

attentionnel », serait lié au développement cortical. Effectivement, le développement neuronal induit de grands changements cognitifs, surtout dans la petite enfance. Par exemple, dans la première année de vie et encore au-delà, la myélinisation et la spécialisation des zones cérébrales se poursuivent à un rythme soutenu. Cuevas, Bell, Marcovitch et Calkins (2012) ont ainsi mis en évidence une augmentation de la puissance et de la cohérence de l'activité électrique corticale mesurée par électroencéphalogramme entre 5 et 10 mois dans une tâche A-non-B. L'augmentation de la puissance de l'activité électrique corticale, qui correspond à une différence plus marquée à 10 mois qu'à 5 mois entre l'activité cérébrale du scalp comparée à celles des régions corticales, reflète la maturation neuronale qui s'opère (Bell & Fox, 1994). L'augmentation de la cohérence de l'activité électrique mesurée par électroencéphalogramme signifie que les zones neuronales se spécialisent puisque la tâche A-non-B recrute trois zones cérébrales à 5 mois contre seulement une à 10 mois. Les travaux de Cuevas et al. (2012) rejoignent des travaux antérieurs montrant que, durant la toute petite enfance et la petite enfance, l'activation du cortex passe d'une activation diffuse à une activation de plus en plus focalisée (Bell & Wolfe, 2007). Ce phénomène rejoint les observations faites à partir de l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle qui conclue, à partir de patterns développementaux d'activation, à une augmentation de la spécialisation de l'activité électrique neuronale avec le développement (voir Casey, Tottenham, Liston, & Durston, 2005 pour une revue).

Mais la maturation neuronale et la spécialisation se poursuivent bien au-delà durant l'enfance. Ainsi entre 3 et 5 ans, les processus régulateurs de la cognition sont de plus en plus performants : inhibition d'une réponse (Livesay & Morgan, 1991), MDT et contrôle inhibiteur (Diamond, Prevor, Callender, & Druin, 1997), flexibilité représentationnelle, mise en perspective et conservation (Flavell, Green, & Flavell, 1986 ; Piaget, 1952), compréhension des règles et exécution des réponses (Zelazo, Müller, Frye, & Marcovitch, 2003), fonctionnement exécutif global (Welsh, Pennington, & Grossier, 1991), attention exécutive et flexibilité attentionnelle (Jones, Rothbart, & Posner, 2003).

La capacité intrinsèque de la MDT, quant à elle, est fortement en lien avec la myélinisation et l'activité cérébrale de la zone spécifiquement frontale (Klingberg, Forssberg, & Westerberg, 2002 ; Nagy, Westerberg, & Klingberg, 2004 ; Wolfe & Bell, 2004, 2007), le

cortex frontal étant intrinsèquement lié aux processus cognitifs de haut niveau par ailleurs. Or le rythme de maturation du cortex préfrontal est particulièrement intense de 2 à 6 ans (Kagan & Baird, 2004), la myélinisation se poursuivant jusqu'à l'adolescence, voire même jusque chez les jeunes adultes (Schneider, Il'yasov, Hennig, & Martin, 2004). Or, comme on l'a vu précédemment, le cortex préfrontal est en jeu dans toutes les situations de tâches multiples, c'est-à-dire quand la MDT entre en jeu. Ainsi, les réseaux neuronaux se développent jusqu'à 4 ou 5 ans dans le gyrus denté (Eckenhoff & Rakic, 1991), et jusqu'à l'adolescence dans le cortex préfrontal (Huttenlocher, & Dabholkar, 1997). Or, le gyrus denté est la voie de communication principale entre le néocortex et l'hippocampe dans le système nerveux mature. L'hippocampe est l'endroit où les traces mémorielles sont intégrées et consolidées pour un stockage à long terme. La mémorisation, et pour ce qui nous concerne ici la MDT, sont contraintes par le développement neuronal, notamment celui des zones frontale et préfrontale.

Ainsi, on note que le développement des structures corticales liées aux activités de la MDT est particulièrement tardif. Ceci est déterminant dans l'étude de la mémoire chez le très jeune enfant car ces structures sont impliquées dans toutes les phases de la mémorisation : encodage, consolidation, stockage et récupération (Bauer, 2009). Mais les facteurs neuronaux ne sont pas les seuls à prendre en considération dans l'augmentation de l'efficacité de la MDT.

3.2. Amélioration des traitements de base

L'augmentation de la vitesse de traitement, tout comme l'amélioration dans l'efficacité du traitement peuvent expliquer, au moins en partie, l'augmentation des capacités en mémoire de travail.

S'il est établi que la vitesse de traitement augmente de manière importante durant l'enfance (Kail, 2000 ; Kail & Park, 1992, 1994), les auteurs peuvent en expliquer différemment l'impact sur l'efficacité de la MDT. Ainsi, Case et al. (1982, 1985) ont utilisé l'hypothèse de la diminution du coût cognitif du traitement comme facteur déterminant dans l'augmentation développementale de l'empan de comptage. Cela est en lien avec la vitesse de traitement car moins un traitement est cognitivement coûteux et plus il s'exécute rapidement. Par exemple, plus les enfants deviennent experts en comptage et plus ils

comptent vite. Ainsi, les auteurs considèrent qu'il existe un espace total de traitement (*Total Processing Space*) qui est de capacité fixe, immuable au cours de la vie. Cet espace total de traitement est divisé en deux parties dont la taille relative peut varier l'une par rapport à l'autre. Ces deux parties sont d'une part un espace de traitement (*Operating Space*) et d'autre part un espace de maintien (*Short Term Storage Space*). Par un système d'échange (*Trade-off*) entre les deux espaces de traitement et de stockage à l'intérieur de l'espace total de traitement, l'espace disponible pour le maintien augmente quand l'espace nécessaire au traitement diminue. Ainsi, moins un traitement est cognitivement coûteux (et donc plus il est rapide) et moins il est « volumineux » au sein de l'espace de traitement. Il laisse alors davantage d'espace disponible, et donc de ressources, dans l'espace total de traitement, pour le maintien à court-terme (Figure 3.1).

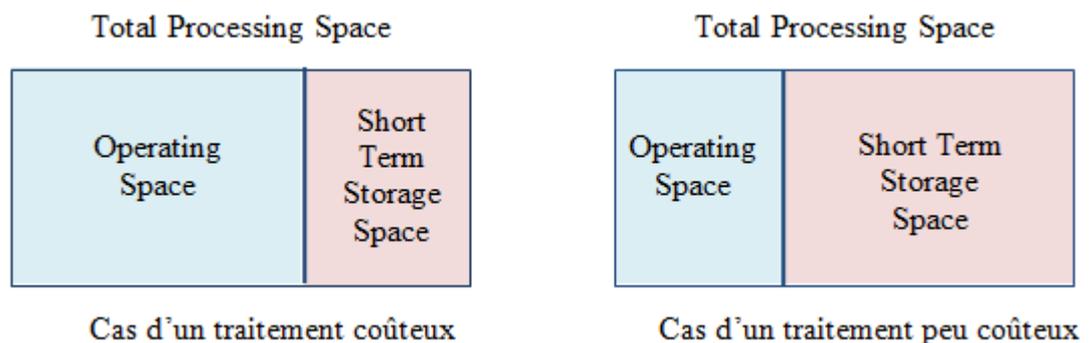


Figure 3.1 : L'espace total de Traitement, Case et al. (1982, 1985).

Case et al. (1982, 1985) expliquent ainsi l'augmentation développementale de l'empan de comptage observée au travers de la tâche de *counting span*. Cet accroissement de l'empan serait lié au fait qu'avec l'âge le dénombrement devient plus expert, et donc plus rapide et moins volumineux. Le traitement laisse alors davantage de ressources pour le maintien. Les auteurs s'appuient sur deux faits pour étayer leur hypothèse. Le premier fait est qu'il existe une relation linéaire entre l'empan de comptage et la vitesse avec laquelle les enfants des différents âges sont capables de dénombrer. D'autre part, lorsque les adultes sont amenés à dénombrer à partir d'une chaîne numérique inventée qu'ils ont apprises au début de l'expérience (suite de syllabes sans sens) et qu'ils maîtrisent donc peu, alors leurs compétences mémorielles chutent et rejoignent celles des enfants en cours d'apprentissage. Cependant, Towse et Hitch (1995) proposent une explication alternative. Selon eux, les enfants qui sont les plus rapides à dénombrer sont aussi ceux qui peuvent procéder le plus

rapidement au rappel. Ils sont donc inévitablement avantagés. En effet, ils peuvent rappeler les items après un délai plus court que les autres enfants et donc récupérer les traces mémorielles avant qu'elles ne déclinent trop du fait du déclin temporel.

Cependant, l'augmentation développementale de l'empan de comptage peut aussi s'expliquer par l'amélioration de l'efficacité du traitement. Ainsi, les enfants qui bénéficient d'une vitesse d'articulation supérieure aux autres (les plus âgés donc) sont capables de réactiver plus de traces mémorielles que leurs pairs durant le même intervalle de temps. Il en résulte un meilleur rappel des items à maintenir (Hitch, Halliday, 1983 ; Hulme, Thomson, Muir & Lawrence, 1984). Pour étayer cette hypothèse, les auteurs s'appuient sur le fait qu'il y a une relation linéaire entre la vitesse d'articulation avec l'âge et l'empan de mots dans des tâches de rappel de mots de différentes longueurs (Baddeley, Thomson & Buchanan, 1975). Cela signifierait que, durant un laps de temps t , les enfants qui articulent le plus rapidement vont pouvoir opérer la répétition subvocale sur un plus grand nombre d'items que leurs pairs articulant moins rapidement. De fait, un plus grand nombre d'items seront réactivés et les performances de rappel s'en verront améliorées. De la même manière, d'autres auteurs ont observé des relations linéaires entre l'augmentation développementale de l'empan et la vitesse de lecture (Spring, & Capps, 1974).

En outre, d'autres processus seraient de plus en plus performants avec l'âge, ce qui pourrait, là encore, expliquer l'amélioration de l'efficacité de la MDT avec l'âge. Gilchrist, Cowan et Benjamin (2009) ont par exemple montré, dans une tâche de rappel libre de phrases écoutées, qu'il existe une augmentation développementale du nombre de chunks pouvant être maintenus en mémoire (mais pas d'augmentation de leur taille), ce qui confirme des résultats antérieurs (Burtis, 1982 ; Cowan et al., 2005 ; Johnson, Im-Bolter & Pascual-Leone, 2003 ; Pascual-Leone, 1970, 2005). Loyd, Newcombe et Doydum (2009) montrent quant à eux que l'augmentation des performances avec l'âge, entre 4 et 6 ans, dans une tâche de mémorisation d'éléments combinés ou non (objets, arrière-plans), ne proviendrait pas d'une meilleure capacité d'encodage avec l'âge mais bien d'une récupération plus efficace de l'information chez les enfants plus âgés. Cependant, il est avéré que le type d'encodage évolue avec l'âge passant d'une absence de stratégie aux alentours de 3-4 ans, à un codage visuel à 4-5 ans, puis visuel et phonologique à partir de 5-6 ans,

avant d'être entièrement phonologique par recodage des éléments visuels sous une forme verbale (Palmer, 2000 ; Purser, & Jarrold, 2010 ; Henry, Messer, Luger-Klein, & Crane, 2012).

Ce dernier résultat concorde avec les travaux de Howard et Polich (1985) réalisés à l'aide d'un électroencéphalographe. Plus spécifiquement, la latence des ondes P300 est associée aux activités de MCT (Donchin, Ritter, & McCallum, 1978 ; Polich, Howard, & Starr, 1983) et est observée quand un stimulus est catégorisé. Les auteurs ont étudié les pics de latence des ondes P300, chez des enfants entre 5 et 14 ans et des adultes, dans des tâches d'empan simple et des tâches d'empan de comptage. Ils ont ainsi mis en évidence que l'augmentation de l'empan mémoriel avec l'âge est liée à l'augmentation de la vitesse avec laquelle les items à retenir sont encodés et identifiés. L'encodage et l'identification sont de plus en plus rapides car automatisés, et exigent, de fait, de moins en moins de ressources attentionnelles. Enfin, Bayliss, Jarrold, Baddeley, Gun et Leigh (2005) rapprochent les deux perspectives puisque l'analyse de facteurs, portant sur les données provenant de sujets de 6 à 10 ans, a montré l'existence de deux facteurs reliés mais néanmoins séparés. Le premier facteur identifié était la vitesse générale de traitement, et le second reflétait la variance commune entre les tâches verbale et spatiale d'une part et la mesure de la vitesse d'articulation d'autre part. Ce second facteur, que les auteurs ont interprété comme reflétant les capacités de stockage, pourrait être lié au fait qu'avec le développement, la vitesse à laquelle les enfants peuvent réactiver les traces mémorielles augmente. Ainsi fait, le nombre d'items qu'ils pourraient réactiver avant la présentation de l'épisode de traitement suivant augmenterait lui aussi. Cette dernière étude montre bien comment vitesse de traitement et amélioration des traitements de base peuvent concourir à l'amélioration développementale des performances en MDT.

Le développement cognitif repose donc sur des processus d'automatisation permettant, avec l'âge, une accélération des processus en œuvre et par là-même, une utilisation de plus en plus efficace des ressources en MDT, et plus généralement des ressources du système. Il est difficile de déterminer exactement quelle est la part de chaque type de facteur, i.e. augmentation de la vitesse de traitement d'une part et amélioration de l'efficacité du traitement d'autre part, dans l'amélioration des performances développementales de rappel. Il semble que le développement soit la somme, le résultat

d'un enchevêtrement de l'ensemble des améliorations découlant de la maturation du système nerveux.

3.3. Amélioration des stratégies : macro-niveau vs micro-niveau

Parmi les nombreux facteurs pouvant être évoqués pour expliquer l'augmentation des performances mémorielles des enfants, ou bien l'amélioration de leurs performances de manière plus générale, il y a la découverte de nouvelles stratégies et, bien sûr, l'amélioration de l'efficacité de ces stratégies (Flavell, 1979 ; Siegler, 1996). Les stratégies sont des processus dirigés vers des buts, utilisés pour améliorer les performances en mémoire. Elles demandent un effort mental, elles sont contrôlables et sont généralement mises en œuvre délibérément par les individus, ce qui fait qu'elles sont accessibles à la conscience (Harnishfeger & Bjorklund, 1990 ; Pressley & Hilden, 2006). Des différences avec l'âge sont observées aussi bien du point de vue du nombre de stratégies disponibles que de celui de l'efficacité avec laquelle elles sont mises en œuvre. Pendant longtemps, les jeunes enfants étaient considérés comme étant incapables de mettre en œuvre des stratégies. En fait, les jeunes enfants utilisent des stratégies pour tenter de conserver en mémoire les items à retenir. Seulement, ces stratégies sont souvent inefficaces et ne correspondent pas aux stratégies que l'on pourrait attendre qu'ils utilisent. Ainsi, les enfants de 3-4 ans tentent de porter leur attention sur les éléments à ne pas oublier en les regardant par exemple (sorte de *rehearsal* visuel ; Baker-Ward, Ornstein, & Holden, 1984 ; Wellman, Ritter, & Flavell, 1975), en pointant du doigt l'endroit où ils sont cachés (DeLoache, & Brown, 1983 ; DeLoache, Cassidy & Brown, 1985), en s'appuyant sur des critères (comme par exemple l'identité de l'objet) même s'ils ne sont pas pertinents dans la tâche proposée (repositionnement d'objets ; Blumberg & Torenberg, 2005 ; Blumberg, Torenberg & Randall, 2005), ou en tentant de prendre des points de repères uniques dans une tâche visuo-spatiale mais en ne prenant pas les repères les plus pertinents (Heisel & Ritter, 1981). Ces comportements orientés vers des buts montrent bien que les très jeunes enfants sont capables d'inventer et de poursuivre des stratégies mais celles-ci sont inefficaces.

Si l'on s'intéresse à nouveau à la tâche d'empan de comptage, on se souvient qu'à partir de leur modèle *Task-Switching*, Towse et Hitch (1995 ; Hitch, Towse & Hutton, 2001 ; Towse, Hitch, & Hutton, 1998, 2000) expliquaient l'augmentation développementale de

l'empan par une augmentation de la vitesse de dénombrement. Ces auteurs ne font pas mention de l'utilisation de stratégie. En fait, l'attention serait entièrement dévolue au traitement durant l'épisode de traitement puis se déplacerait à la fin de l'épisode de traitement pour être dévolue entièrement au maintien des traces à rafraîchir, avant de s'orienter à nouveau vers le traitement pour l'épisode suivant. Camos et Barrouillet (2011 ; Barrouillet, Bernardin, Camos, 2004 ; Barrouillet, Bernardin, Portrat, Vergauwe, Camos, 2007) proposent une explication alternative. Selon ces auteurs, en référence au modèle TBRS, le maintien de l'information et les performances de rappel dans des tâches de MDT dépendent d'une stratégie spécifique nommée rafraîchissement attentionnel. Le rafraîchissement attentionnel consiste à déplacer l'attention sur le maintien durant les épisodes de traitement pour réactiver subrepticement les traces déclinantes. Le rafraîchissement ainsi opéré permet de contrecarrer l'oubli dû au temps qui passe. Ceci n'est possible que si le traitement n'est pas trop coûteux, c'est-à-dire s'il reste de l'attention résiduelle pouvant être réorientée vers les traces à rafraîchir. Au contraire, si le traitement nécessite la mobilisation de toutes les capacités attentionnelles, l'attention ne peut plus s'orienter vers le maintien et les traces déclinent alors avec le temps, et ce jusqu'à la fin du traitement. Pour définir précisément cette notion de charge imputable à la tâche concurrente, Barrouillet et al. (2004, 2011) ont introduit la notion de temporalité à celle de la charge cognitive. Ainsi, la charge cognitive dépendrait de la proportion de temps durant lequel le traitement capture l'attention, selon l'équation suivante :

$$CC=t_a/t.$$

La charge cognitive (CC) dépend donc du temps durant lequel l'attention est capturée par un item à traiter (t_a) mais aussi du temps total de l'épisode de traitement (t). Ainsi, pour un même temps total de traitement, la charge cognitive augmente si le nombre d'items à traiter augmente lui aussi (Figure 3.2).

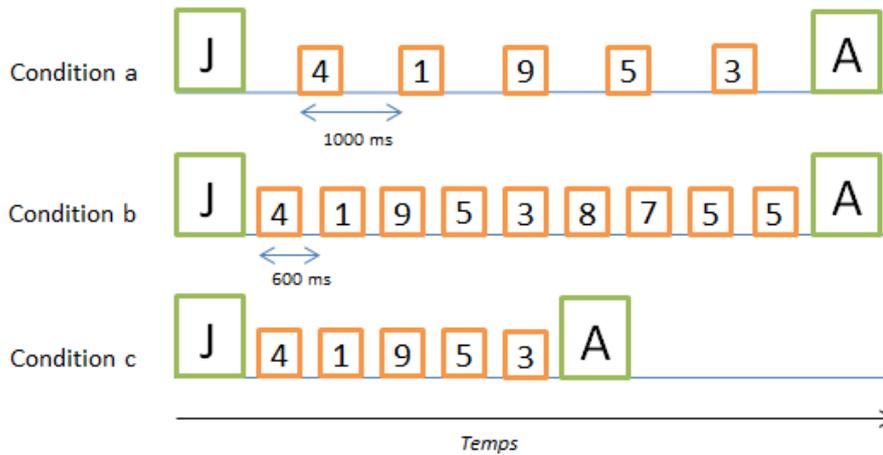


Figure 3.2 : Exemple d'une tâche d'empan où le nombre d'items à traiter (les chiffres) durant l'épisode de traitement est manipulé, ainsi que la durée totale de l'épisode de traitement. Le maintien consiste à mémoriser les lettres.

Telle que l'illustre la Figure 3.2, la charge cognitive de la condition *b* est plus élevée que celle de *a*, puisqu'il y a plus d'items à traiter en *b* qu'en *a* pour un même temps total de traitement. Les performances devraient donc être inférieures en *b* qu'en *a*. De la même manière, la condition *c* entraîne une charge cognitive plus élevée que la condition *a* puisqu'il y a le même nombre d'items à traiter, mais que le temps total de traitement est plus court en *c* qu'en *a*, rendant la tâche plus difficile. Aussi, les performances devraient-elles être supérieures en *a* qu'en *c* selon l'hypothèse de Barrouillet et al. (2004). Notons que, selon l'hypothèse de Towse et Hitch (2007) selon laquelle la durée totale de traitement seule influe les performances, celles-ci devraient être supérieures en *c* qu'en *a* ou *b* puisque le temps total de traitement est inférieur en *c* qu'en *a* ou *b*. Dans une expérience menée auprès d'adultes (Barrouillet et al., 2004, 2007), une tâche de mémorisation de lettres a été proposée, le traitement consistant à lire des chiffres dans l'intervalle situé entre la présentation de deux lettres à mémoriser. Le nombre de chiffres à lire durant l'intervalle et la longueur de l'intervalle ont été manipulés, conformément à la Figure 3.2. Il en ressort que la charge cognitive est le facteur déterminant des performances, les performances augmentant quand la proportion de temps durant lequel l'attention est occupée par le traitement diminue. Ces résultats ont été confirmés auprès d'enfants de 7 à 14 ans (Barrouillet et al., 2009, Expérience 1) confirmant que les enfants, comme les adultes sont capables de déplacer leur attention durant l'épisode de traitement pour rafraîchir subrepticement les traces mémorielles. Cependant, l'effet de la charge cognitive était moins

marqué chez les plus jeunes enfants (7 ans) suggérant peut-être que les jeunes enfants réactiveraient moins rapidement les traces mémorielles que les plus âgés (Bayliss et al. 2005 ; Cowan et al., 1994), ou alors qu'il leur serait plus difficile d'orienter alternativement leur attention d'un domaine à l'autre (maintien vs traitement) du fait de capacités attentionnelles limitées. Cette dernière hypothèse rejoint d'ailleurs les résultats de Barrouillet et al. (2009, Expérience 3) montrant l'absence d'impact de la charge cognitive à 5 ans.

Pour réconcilier ces deux approches, Hitch (2006) avait proposé que le développement de la MDT dans l'enfance pouvait provenir du passage d'un macro-niveau de switching, tel que celui décrit dans le modèle du *Task-Switching*, switching qui opère après la fin de l'épisode de traitement, à un micro-niveau de switching, tel que celui décrit dans le TBRS où l'attention passe continuellement du maintien au traitement et cela, durant les épisodes de traitement même. Camos et Barrouillet (2011) ont alors eu l'idée ingénieuse de manipuler orthogonalement les deux facteurs que sont la charge cognitive de la tâche et le temps total de traitement dans une étude proposée à des enfants de 6 et 7 ans. Leur but était de déterminer quel(s) étai(en)t le(s) facteur(s) déterminant(s) pour expliquer l'augmentation développementale de l'empan (Figure 3.3).

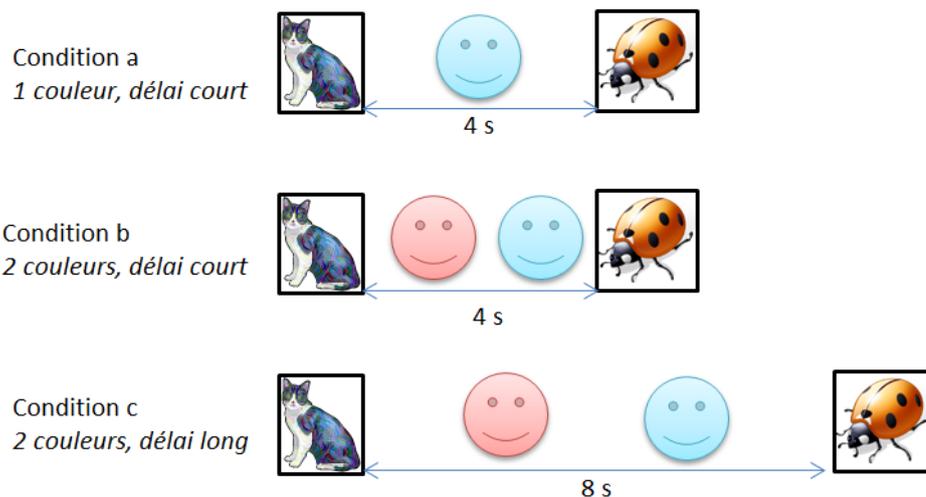


Figure 3.3. Illustration des 3 conditions expérimentales de l'expérience de Camos et Barrouillet (2011) où charge cognitive de la tâche (items à traiter) et temps total de traitement ont été manipulés.

Les hypothèses étaient simples. Si les enfants déplaçaient leur attention durant les épisodes de traitement, c'est-à-dire s'ils opéraient un switching de micro-niveau, alors leurs

performances devraient dépendre uniquement de la charge cognitive de la charge de traitement. Les performances seraient donc meilleures en *a* qu'en *b* et en *c*, les performances en *b* et *c* ne devant pas différer. Au contraire, si les enfants orientaient leur attention sur les items à maintenir uniquement à la fin de l'épisode de traitement, opérant ainsi un switching de macro-niveau, alors leurs performances devraient dépendre uniquement du temps total de traitement. Aussi, leurs performances seraient inférieures en *c* plutôt qu'en *a* et en *b*, les performances en *a* et *b* ne différant pas par ailleurs. Les résultats ont été très clairs. Les performances des enfants de 6 ans dépendaient uniquement du temps total de traitement alors que la charge cognitive de la tâche n'influeait pas les performances : les enfants de 6 ans opèrent donc un switching de macro-niveau, tel que décrit par Towse et Hitch (2007). Au contraire, à 7 ans, les performances dépendent uniquement de la charge cognitive de la tâche concurrente et non pas du temps de traitement total : les enfants de 7 ans opèrent donc un switching de micro-niveau tel que décrit par le TBR. Ainsi, à 7 ans, les enfants mettent en œuvre un maintien actif des informations en MDT, switchant sans discontinuer entre maintien et traitement dès que cela est possible c'est-à-dire quand la charge cognitive de la tâche concurrente le permet. Par contre, à 6 ans, les enfants mettent en œuvre un stockage passif des informations en MDT.

L'étude de Camos et Barrouillet (2011) a donc permis de réconcilier les deux approches : le développement de l'empan peut s'expliquer, du moins en partie, par le passage d'une stratégie de switching de macro-niveau à une stratégie de switching de micro-niveau, stratégie plus fine mais demandant davantage de contrôle attentionnel. Autrement dit, avec le développement, les enfants passent d'une stratégie sérielle de résolution d'activité complexe (i.e., maintien et traitement traités alternativement) à une stratégie de partage de l'attention qui permet de mener les deux tâches de maintien et de traitement en parallèle. Cela ne signifie pas pour autant que les jeunes enfants ne sont jamais capables de mettre en œuvre des stratégies de maintien mais que, dans cette situation de double-tâche, la demande attentionnelle est telle qu'elle pourrait bloquer la mise en œuvre de mécanismes de maintien tels que la répétition subvocale ou le rafraîchissement attentionnel. Une autre hypothèse serait que les jeunes enfants ne disposeraient pas d'un contrôle attentionnel suffisant pour opérer un switching durant l'épisode de traitement. Le contrôle attentionnel est donc lui aussi un facteur important qui permet d'expliquer en

partie l'augmentation développementale de l'empan en MDT, d'autant qu'il évolue énormément durant la petite enfance.

3.4. Amélioration du contrôle attentionnel

L'empan en MDT constituerait un indicateur des capacités de contrôle de l'individu. D'ailleurs, Baddeley (1993) remarque après coup qu'il aurait été plus exact de parler d'attention de travail (*working attention*) plutôt que de MDT, plaçant de ce fait l'attention au cœur même des capacités en MDT. En fait, en présence d'interférences dont l'intensité est contrôlée (i.e., nombre d'items distracteurs), les individus qui sont capables de restituer le plus grand nombre d'éléments sont ceux qui jouissent de capacités de contrôle les plus élevées (puisque à un même niveau de contrôle, ils sont capables d'exercer le contrôle sur un plus grand nombre d'éléments). Cela concorde tout à fait avec le modèle de MDT d'Engle et al. (1999). Selon ces auteurs, si la MDT comprend une composante de stockage, c'est surtout l'attention contrôlée qui en constitue l'essence. Or les capacités attentionnelles, sous dominance du cortex frontal et préfrontal, se développent beaucoup durant la toute petite enfance et la petite enfance du fait de la maturation neuronale comme nous l'avons vu dans la section 3.1. Bien sûr, si les capacités augmentent, il est nécessaire de s'intéresser à la manière dont elles sont dirigées, exploitées, contrôlées. C'est ce que l'on nomme le contrôle attentionnel. Le développement du contrôle attentionnel durant la petite enfance se caractérise par l'amélioration de deux processus. Le premier est la capacité à focaliser son attention, ou attention sélective, en lien avec la capacité à inhiber les informations non pertinentes. Le second est la capacité à maintenir ce focus attentionnel, ou attention soutenue, durant un temps de plus en plus long.

Dès les années 60, de nombreux auteurs avaient mis en évidence que les jeunes enfants avaient moins de capacités que les plus âgés à focaliser leur attention sur les éléments importants (Hagen, 1967 ; Maccoby & Hagen, 1965). Cette capacité à orienter efficacement l'attention est fortement liée à la capacité à inhiber des informations non pertinentes, lesquelles par leur activation captent inutilement des ressources attentionnelles. Cowan (1999) avait d'ailleurs explicitement incorporé dans le modèle des Processus Emboîtés l'idée que l'inhibition était un élément important de la MDT par le fait qu'elle favorise le contrôle du focus attentionnel de la MDT. Ainsi, Hasher et Zacks (1988),

mais aussi Bjorklund et Harnishfeger (1990), ont suggéré que l'augmentation développementale de la MDT serait liée à une capacité grandissante à inhiber les informations non pertinentes.

Les changements survenant dans le contrôle attentionnel chez les bébés et les enfants d'âge préscolaire sont dus, tout du moins en partie, au développement de deux sous-systèmes (Posner & Fan, 2004 ; Rothbart & Posner, 2001). Le premier est un système d'orientation de l'attention qui permet à l'enfant d'orienter le focus attentionnel parmi les stimuli de l'environnement et de modifier l'orientation de l'attention quand cela est nécessaire. Il se développe surtout dans la première année de vie (Colombo, 2001). Le second est un système d'attention antérieure qui sélectionne et améliore le traitement, en accord avec des représentations antérieures, en partie en inhibant des informations non pertinentes et en partie en facilitant la mise en œuvre du sous-système d'orientation de l'attention (Ruff & Rothbard, 1996). Le système d'attention antérieure nous intéresse particulièrement car il évolue de manière particulièrement nette entre 2 et 6 ans (Harman & Fox, 1997 ; Rothbart & Posner, 2001). L'émergence de ces deux sous-systèmes, et plus particulièrement du second, qui pilote aussi le premier, permet d'améliorer peu à peu la capacité de l'enfant à identifier les éléments auxquels porter attention et à focaliser son attention dessus, et dans le même temps à inhiber les éléments sur lesquels l'attention ne doit pas porter.

D'autres auteurs insistent sur le fait que les changements observés, entre la toute petite enfance et l'enfance, dans la capacité à mettre en œuvre l'attention sélective proviendrait davantage d'une augmentation substantielle du temps durant lequel l'attention peut se focaliser (Lansink, Mintz, & Richards, 2000 ; Richards, 1989 ; Richards & Casey, 1991). Ainsi, dans une tâche où les enfants sont assis à une table et doivent appuyer sur un bouton en réponse à un stimulus, tâche répétitive et monotone impliquant la mise en œuvre d'une attention soutenue, les performances augmentent de manière marquée entre 3 et 5 ans (Akshoomoff, 2002 ; Corkum, Byrne, & Ellsworth, 1995 ; Mahone, Pillion & Hiemenz, 2001). Cependant, même à 5 ans, les enfants font encore des erreurs d'omissions prouvant que l'habileté à focaliser et à soutenir l'attention dans des tâches de laboratoire émergent seulement. Ainsi, le contrôle attentionnel augmente de manière significative entre 2 et 6

ans, aussi bien dans le versant de la capacité à inhiber les informations non pertinentes, que dans la capacité à maintenir le focus attentionnel durant un temps de plus en plus long.

En résumé, grâce à la myélinisation et à la spécialisation neuronale durant l'enfance, le traitement devient de plus en plus rapide mais aussi de meilleure qualité. On passe ainsi d'un fonctionnement global, diffus et lent à un fonctionnement précis, localisé et rapide. Ceci entraîne de fait une augmentation de l'efficacité de la mémoire de travail. Le développement des stratégies et un meilleur contrôle attentionnel de l'activité mentale entrent aussi en ligne de compte dans l'amélioration développementale des performances dans les activités cognitives de haut niveau. Or, l'habileté à orienter le focus attentionnel sur une tâche et ignorer les informations non pertinentes pour la tâche en cours est la première étape de tout comportement orienté vers un but. L'ensemble des processus cognitifs mis en œuvre dans la résolution de problèmes dirigés vers des buts sont regroupés sous le terme de fonctions exécutives (Burgess & Simons, 2005 ; Hughes, 2011 ; Zelazo, Carter, Reznick, & Frye, 1997). Ce sont des processus qui permettent l'adaptation à des situations nouvelles avec intervention d'un contrôle, d'une conscience supplémentaire (Damasio, 1995, Duncan, 1986, Shallice, 1982).

4. Fonctions exécutives et contrôle attentionnel chez le jeune enfant.

Les cinq premières années de vie jouent un rôle primordial dans le développement des fonctions exécutives. Celles-ci peuvent se définir comme « une famille de processus mentaux de haut niveau, nécessaires dans les situations où l'on doit se concentrer ou être attentif, et dans les situations où le fait de se reposer sur les automatismes, ou de se fier à l'instinct ou l'intuition n'est pas judicieux, suffisant ou possible» (Diamond, 2013). Elles sont donc à l'œuvre dans de multiples activités quotidiennes non-automatisées telles que les apprentissages scolaires, la résolution de problèmes ou encore la mise en place de nouvelles conduites. Ainsi, l'efficacité des fonctions exécutives est un bon prédicteur des apprentissages préscolaires (Alloway & Alloway, 2010 ; Vitiello, Greenfield, Munis, & George, 2011) et scolaires (St Clair-Thompson & Gathercole, 2006 ; McClelland, Cameron, Connor, Farris, Jewkes, & Morrison, 2007). Or, nous avons aussi décrit en 1.3 à quel point MDT et habiletés académiques sont liées. Nous allons donc dès à présent situer la MDT au sein des fonctions exécutives. Puis, les tâches de MDT étant spécifiquement des tâches orientées vers des buts, nous nous intéresserons plus particulièrement à la gestion du but par le jeune enfant et nous présenterons un modèle de production de comportement orienté vers un but : ACT-R (Anderson, 1995). Enfin, nous évoquerons le rôle particulier de la motricité dans la cognition ce qui nous amènera à définir le troisième objectif de ce travail de thèse.

4.1. Définition des fonctions exécutives et lien avec la mémoire de travail

Aujourd'hui, on définit les fonctions exécutives comme l'ensemble des processus permettant à un individu de réguler de façon intentionnelle sa pensée et ses actions afin d'atteindre des buts, (Miyake, Friedman, Emerson, Howerter, & Wagner, 2000). La régulation qu'elles permettent est généralement appelée « contrôle exécutif » en neuropsychologie ou « contrôle cognitif » en psychologie cognitive. Ces appellations ne vont pas sans rappeler celle de siège du contrôle exécutif donnée à l'administrateur central du modèle de Baddeley (2003) dont le rôle est notamment de « focaliser, diviser et de basculer l'attention ». De même, Cowan (2001) présente le processeur central exécutif comme le

composant responsable du contrôle et de l'orientation de l'attention. Enfin, dans le modèle de Norman et Shallice (1986) est évoqué le Système Attentionnel Superviseur (SAS) lequel assure le contrôle exécutif.

De nombreux travaux suggèrent que le contrôle exécutif joue un rôle central dans la cognition de l'enfant (Blaye, Chevalier, & Paour, 2007 ; Blaye & Jacques, 2009 ; Willoughby, Kupersmidt, & Voegler-Lee, 2012). Mémoire de travail et fonctions exécutives sont donc fortement liées, ce qui est tout à fait congruent avec le fait que, comme la MDT, le développement des fonctions exécutives est intrinsèquement lié à la maturation du cortex préfrontal et notamment du cortex préfrontal dorsolatéral, ces aires cérébrales étant parmi les plus lentes à se développer (Benes, 2001 ; Huttenlocher & Dabholkar, 1997 ; Sheibel & Levin, 1997). On conçoit ainsi qu'il y ait une accélération importante des performances dans de nombreuses tâches de fonctions exécutives durant l'enfance, notamment entre 3 à 6 ans (Posner & Rothbart, 1998 ; Rothbart & Posner, 2001). La MDT, contrôlant et s'appuyant sur les fonctions exécutives, voit donc elle aussi ses performances croître rapidement dans la petite enfance.

Précisément, les principales fonctions exécutives, telles qu'elles sont identifiées par la plupart des chercheurs, sont l'inhibition, la mise à jour de la mémoire de travail et la flexibilité cognitive (Fish & Sharp, 2004; Miyake et al., 2000 ; Vaughan & Giovanello, 2010). Ainsi, Dempster et Brainerd (1995) définissent l'inhibition comme la capacité à bloquer ou supprimer les processus, les informations ou les réponses non pertinentes dans la poursuite de l'objectif à atteindre. Ceci permet la focalisation de l'attention sur les informations pertinentes pour la tâche en cours (Hasher & Zacks, 1988 ; Shallice & Burgess, 1991). L'inhibition concerne donc des informations déjà présentes en MDT alors que la résistance à l'interférence consiste, elle, à bloquer des informations avant même leur entrée en MDT. La mise à jour de la MDT, quant à elle, consiste à remplacer en MDT les informations précédemment pertinentes par de nouvelles informations, ou bien à réorganiser les informations déjà contenues en MDT (Verhaeghen, 2012). Elle est à l'œuvre dans l'ensemble des tâches de MDT telles que nous les avons présentées dans la section 1.4. Enfin, la flexibilité cognitive réfère à la «capacité à considérer simultanément plusieurs représentations conflictuelles d'un objet ou d'un évènement et à basculer entre ces

représentations en réponse à des changements dans l'environnement » (Best, Miller, & Jones, 2009 ; Blaye & Jacques, 2009 ; Chevalier & Blaye, 2006 ; Jacques & Zelazo, 2005 ; voir aussi Cragg & Chevalier, 2012 ; Garcia-Garcia, Barcelo, Clemente, & Escera, 2010 ; Geurts, Corbett & Solomon, 2009). La flexibilité cognitive rentre en jeu notamment dans toutes les tâches où le sujet doit alterner, tout au long de la tâche, entre plusieurs traitements à opérer sur un matériel immuable. C'est le cas, par exemple dans la tâche de tri de cartes du DCCS (*Dimensional Change Card Sort*), paradigme décrit plus en détail dans la section suivante.

Si nous avons défini séparément chacune des fonctions exécutives, celles-ci ne sont pourtant pas clairement séparables dans la petite enfance. Par exemple, l'inhibition et le maintien actif en MDT saturent un seul et même facteur chez les enfants d'âge préscolaire (Wiebe, Espy, & Charak, 2008 ; Hughes, Ensor, Wilson & Graham, 2010) en particulier à 3 ans (Wiebe, Sheffield, Nelson, Clark, Chevalier & Espy, 2010). Ces deux fonctions ne sont alors pas encore différenciables à cet âge alors que les trois fonctions exécutives apparaissent séparables dès l'âge de 7 ans, (Huizinga, Dolan, & van der Molen., 2006 ; Lehto, Juujärvi, Kooistra, & Pulkkinen, 2003 ; Miyake et al., 2000 ; voir Carlson, 2005 pour une différenciation observée à 5 ans). Ainsi, peu à peu durant la période préscolaire, les fonctions exécutives se séparent et se spécialisent progressivement.

Cependant les fonctions exécutives, même chez l'adulte où elles sont parfaitement différenciées, partagent un socle commun qui pourrait être lié au maintien des informations en mémoire de travail (Miyake et al., 2000) et notamment du but à atteindre (Friedman et al., 2008). Baddeley, Chincotta & Adlam (2001 ; Gruber & Goschke, 2004) avaient d'ailleurs déjà montré les liens très étroits entre la MDT et la gestion des buts. Par exemple, l'amélioration des performances dans les épreuves où le sujet doit décider, sur des stimuli identiques, quel traitement réaliser en fonction de la situation (i.e., paradigme de *task-switching*, *Wisconsin Card Sort Test*), est au moins en partie liée à une capacité grandissante avec l'âge à décider du but pertinent pour la tâche en cours (Davidson, Amso, Cruess Anderson, & Diamond, 2006 ; Huizinga & van der Molen, 2007 ; Somsen, 2007). Ainsi, les études de Chevalier & Blaye (2009 ; Kray & Lindenberger, 2000) suggèrent que l'efficacité des fonctions exécutives pourrait être étroitement liée à la capacité d'un individu à mettre en place et à poursuivre un but qu'il s'est fixé. Du fait que notre étude s'intéresse

spécifiquement au jeune enfant, le point suivant traite de la manière dont le jeune enfant parvient à sélectionner le but pertinent de la tâche en cours et à le maintenir en mémoire.

4.2. La gestion du but par le jeune enfant

Le comportement dirigé vers un but est complexe. Il nécessite une représentation du but à atteindre, la formulation de la planification à mettre en œuvre pour atteindre ce but, mais aussi le fait de garder à l'esprit le but à atteindre pour guider le comportement à chacune des étapes. Selon Engle et Kane (2004), les différences individuelles dans la capacité de MDT peuvent être attribuées prioritairement à la différence dans le contrôle du maintien actif des informations pertinentes concernant le but de l'activité. Les sujets ayant des capacités de MDT plus élevées seraient en effet plus aptes à résister à la distraction. En fait, le maintien du but repose sur des compétences autorégulées telles que la persévérance et la résistance à la distraction, qui sont des facteurs connus prédisant par ailleurs l'inclination scolaire et la réussite sur le plan académique (Blair, 2002 ; McClelland et al., 2007). Comme nous l'avons dit précédemment, la composante de gestion des buts est la part commune des trois fonctions exécutives. Plus précisément, Friedman et al. (2008) ont proposé que la part commune à la flexibilité, à l'inhibition et à la mise à jour de la mémoire de travail, observée à 6/7 ans, est le reflet même de la capacité à extraire et à se représenter le but à atteindre.

L'étude de Chevalier et Blaye (2009) réalisée à partir du paradigme du *Dimensional Change Card Sort* (DCCS) avancé va d'ailleurs dans ce sens. Le DCCS standard se présente sous la forme d'un jeu de tri de cartes. Les cartes représentent des objets bidimensionnels (i.e., un lapin rouge, un bateau bleu) que le sujet doit trier dans deux boîtes différentes. Sur chaque boîte, une carte cible est fixée et représente le critère de tri correspondant à la boîte (i.e., un lapin pour trier les cartes lapin). Dans un premier temps, les enfants sont invités à trier les cartes selon un premier critère (i.e., la couleur, rouge vs bleu) verbalisé explicitement par l'expérimentateur. Dans la deuxième partie de l'expérience, les enfants doivent trier les cartes selon l'autre critère (i.e., la forme, lapin vs bateau), critère là encore donné explicitement par l'expérimentateur. Le DCCS avancé apporte une variante qui complexifie la tâche puisque, ce sont des indices qui indiquent à l'enfant qu'il doit changer de critère de tri. Cette fois, le but de la tâche n'est donc pas verbalisé explicitement par l'expérimentateur. La tâche est donc plus difficile puisque les enfants doivent extraire le but

de la tâche à partir de l'indice. Chevalier et Blaye (2009) ont ainsi manipulé la transparence des indices (indices transparents vs indices arbitraires) au travers de 2 expériences menées auprès d'enfants de 5 et 6 ans. Il en ressort que les enfants de 5 et 6 ans réussissent mieux la tâche de tri de cartes lorsque les indices sont transparents que lorsqu'ils sont arbitraires. En fait, même s'ils sont capables de répondre à des questions sur la signification des indices, montrant par là qu'ils ont bien mémorisé leur signification et le but qui y est rattaché, les enfants ont des difficultés à extraire le but de la tâche et à se le représenter durant l'exécution de la tâche. Ainsi, la difficulté à maintenir des buts serait un facteur dominant pour expliquer les faibles capacités en DCCS avancé des enfants de 4 et 5 ans (Marcovitch, Boseovski & Knapp, 2007). En effet, Marcovitch, Boseovski, Kane et Knapp (2010) montrent que les enfants de 4 et 6 ans qui ont les capacités les plus élevées en MDT sont aussi ceux qui maintiennent le but le plus efficacement, notamment dans un contexte où le but de l'activité doit être fréquemment réactivé pour réussir. Ce dernier résultat est congruent avec les études de Kane et Engle (2003) montrant le lien entre le maintien du but et la MDT.

Cette difficulté à extraire, se représenter et à maintenir le but pourrait d'ailleurs découler du fait que maintien du but en mémoire d'une part et discours interne d'autre part seraient fortement liés (Baddeley et al., 2001 ; Emerson & Miyake, 2003 ; Miyake et al., 2004) comme le confirment les résultats de Chevalier et Blaye (2009, Expérience 3) auprès des enfants de 7 et 9 ans. Or les enfants avant 7 ans n'utilisent pas ou très peu le discours interne (Henry, 1991a, 1991b; voir Tam et al., 2010, pour une mise en évidence de répétition subvocale à 6 ans). Ainsi, les jeunes enfants ne peuvent s'aider du discours interne pour élaborer la représentation du but en mémoire, ce qui ne facilite pas son maintien. Leurs performances dans les tâches de MDT sont donc faibles car ils sont plus enclins à oublier le but même de la tâche. Bien sûr, si le but de la tâche est oublié, la tâche ne peut plus s'orienter vers ce but. Anderson (1983, 1996 ; Anderson & Lebière, 1998) a d'ailleurs proposé un modèle expliquant la production d'un comportement orienté vers un but. La présentation de ce modèle permet de comprendre comment la gestion du but de l'activité subordonne la mise en œuvre d'un comportement visant à accomplir la tâche.

4.3. Un modèle de production d'un comportement orienté vers un but

Dans le modèle Adaptive Character of Thought - Rational (ACT-R, Anderson, 1983, 1993, 1996 ; Anderson & Lebiere, 1998), la cognition complexe provient d'une interaction entre connaissances déclaratives et procédurales, toutes deux stockées en MLT. Ce modèle rend compte du fait que l'activité cognitive est orientée et ne se développe pas aléatoirement dans n'importe quelle direction. Elle vise à satisfaire un but. L'idée selon laquelle les traitements sont dirigés par des buts (Anderson, 1983) est très importante dans la théorie ACT-R. Selon Anderson, « toute l'intelligence réside dans une simple accumulation et un agencement de nombreuses unités de connaissances qui, au total, produisent la cognition complexe. L'ensemble n'est pas plus qu'une somme de ses parties, mais il y a beaucoup de parties ». (Anderson, 1996, p.356). Les connaissances qu'évoque Anderson sont de deux types, les connaissances déclaratives et les connaissances procédurales. Les connaissances déclaratives sont des connaissances factuelles, des savoirs que l'on peut « déclarer », par exemple « la capitale de la France est Paris ». Les connaissances déclaratives sont issues de l'encodage des objets de l'environnement. Les connaissances procédurales, quant à elles, sont représentées par des unités nommées règles de production. Elles ne peuvent pas être énoncées verbalement mais se manifestent dans le comportement d'un individu. On pourrait aussi les nommer « savoir-faire » comme par exemple « savoir faire du vélo ». Ce sont toutes ces connaissances et la mise en relation entre connaissances déclaratives et procédurales qui sous-tendent la cognition humaine, par la mise en œuvre de productions.

Le principe de base du modèle est que les habiletés cognitives sont réalisées par les règles de production, c'est-à-dire par les connaissances procédurales. Les règles de production se présentent comme des règles de type « Si.... Alors... » qui relient un ensemble de conditions à un ensemble d'actions. Les conditions réfèrent à des états actuels des connaissances de l'individu, ses connaissances déclaratives, et des buts poursuivis, l'ensemble étant stocké en mémoire de travail. Les actions consistent en une succession d'opérations qui modifient le contenu de la mémoire de travail. Les productions fonctionnent en lisant le contenu de la MDT et en y ajoutant des éléments par leur partie

action. La mise en œuvre d'une production est soumise aux caractéristiques intrinsèques des règles de production et notamment à sa structure en but, notion fondamentale dans ce modèle.

Les conditions d'application des règles de production spécifient les éléments devant être présents en MDT ainsi que le but poursuivi afin de déclencher une production. La mise en correspondance entre les éléments présents en MDT et les conditions d'application des règles de production s'appelle le *pattern matching*. Plusieurs règles de production peuvent présenter des conditions identiques, c'est-à-dire nécessiter le même type d'éléments, mais poursuivre des buts différents. Ainsi, dans l'exemple d'une opération posée, les chiffres peuvent être disposés en colonnes dans le but de faire une addition ou alors une soustraction. Si le but poursuivi est une soustraction, alors la production qui va être instanciée ne sera pas la même que si le but était de réaliser une addition. De la même façon, dans la tâche du DCCS avancé, les conditions d'application de la règle de tri des cartes s'appliquent quand les cartes sont présentes dans le champ de la conscience. Cependant la production instanciée diffèrera en fonction du but poursuivi, c'est-à-dire si les cartes doivent être triées par forme ou par couleur. Ainsi, le maintien du but en mémoire est une condition nécessaire au bon déroulement de l'activité. Or les jeunes enfants ont des difficultés à se représenter et à maintenir le but de l'activité en mémoire. Une fois qu'ils ont trié les cartes selon le critère x , le but de trier selon le critère y lorsqu'il devrait être maintenu car pertinent est oublié et la production instanciée n'est pas correcte.

Ainsi, les productions se déclenchent par appariement quand les éléments présents dans le champ de la conscience et le but poursuivi correspondent aux conditions de leur déclenchement. Elles sont donc organisées autour d'un ensemble de buts (un but final et des sous-buts), un but au moins étant toujours actif à un moment donné. En 2004, Anderson a ajouté des modules, dont notamment le module de but, qui sont intégrés au modèle pour produire une cognition cohérente. Spécifiquement, le module de but permet au sujet de garder le fil de ses pensées en l'absence de la présence de stimuli externes, de garder à l'esprit ses intentions et ainsi le comportement pouvant mener au but. Nous pensons que c'est cette dernière fonction qui est particulièrement importante chez les jeunes enfants du fait de leurs faibles capacités de contrôle attentionnel. En effet, le choix et la poursuite d'un

but est la condition sine qua none au déclenchement de la production appropriée au but poursuivi et cela est cognitivement coûteux.

L'une des idées poursuivies dans la recherche était de tenter d'alléger ou de faciliter le maintien du but en mémoire pour le rendre cognitivement moins coûteux. Ainsi fait, des ressources attentionnelles pourraient être dégagées afin de déclencher une production qui pourrait être le déclenchement d'un mécanisme de maintien des traces en mémoire. Deux facteurs pourraient améliorer l'accroche attentionnelle des enfants, à savoir la présence d'indices visuels et le fait d'être dans une situation physiquement active. Cette dernière idée n'est d'ailleurs pas sans lien avec des observations déjà rapportées sur l'impact de la motricité sur la cognition dans la littérature, comme nous allons le voir dans la section suivante.

4.4. L'apport particulier de l'activité motrice sur le contrôle attentionnel

Dans la vie quotidienne, nous sommes très souvent dans des situations de double-tâche, une tâche étant généralement de type sensorimotrice et l'autre de type cognitive. Par exemple, nous maintenons notre équilibre dans le bus tout en essayant de se remémorer la liste de courses oubliée sur la table. Les ressources attentionnelles étant limitées, les performances sont moins élevées en situation de double-tâche qu'en situation de tâche simple. Les enfants montrent d'ailleurs des diminutions des performances plus marquées que les adultes en situation de double tâche contrairement aux situations de tâche simple (voir Guttentag, 1989 pour une revue). Ce pattern a été aussi observé dans des situations de double-tâche cognitive-sensorimotrice (Krampe, Schaefer, Lindenberger & Baltes, 2008). Cependant, il peut exister des situations dans lesquelles les performances sont améliorées en situation de double-tâche. Dans sa revue de littérature sur le sujet, Tomporowski (2003) montre ainsi que les performances cognitives sont diminuées lorsque l'activité motrice engagée est de forte intensité alors qu'une activité motrice de moindre intensité entraîne l'augmentation des performances cognitives et notamment mémorielles. Deux principaux courants de recherche étudient l'impact bénéfique de l'activité motrice sur la cognition. Le premier explore le rôle de l'utilisation de gestes dans la mémorisation alors que le second étudie davantage l'effet d'une activité motrice plus générale sur la cognition, que ce soit sur

la mémorisation ou sur l'efficacité des fonctions exécutives.

De nombreux auteurs étudient ainsi le bénéfice de l'utilisation de gestes sur la cognition. Ainsi, Cook et Goldin-Meadow (2006) défendent l'idée que les gestes peuvent accompagner, soutenir et améliorer la cognition. Dans des épreuves de résolution de problèmes arithmétiques, de type $7+6+3= ___ +3$, des enfants de 9 et 10 ans se sont vus présenter une méthode de résolution de l'équation avec ou sans gestes. Soit l'expérimentateur, tout en expliquant, pointait de sa main gauche la partie gauche de l'équation (7+6) et de sa main droite la partie droite de l'équation (___) pour soutenir l'explication verbale, soit ne produisait pas de gestes. Les enfants qui ont bénéficié de l'explication gestuelle ont plus souvent utilisé eux-mêmes les gestes durant la résolution de problèmes et ont eu de meilleures performances que les enfants n'ayant bénéficié que de l'explication verbale. Ceci montre que le geste peut modifier la cognition et les auteurs expliquent que la production de gestes serait associée à une réduction de la charge mémorielle. Mais l'activité motrice plus globale aurait aussi la vertu, lorsqu'elle n'est pas trop intensive, d'améliorer la mémorisation. Cohen (1981) puis Engelkamp & Zimmer (1984) ont ainsi montré que les sujets rappelaient mieux des actions lorsqu'ils les avaient exécutées ou qu'ils avaient vu quelqu'un les exécuter plutôt que lorsqu'ils avaient à mémoriser verbalement l'action.

Dans le second courant de recherche, de nombreuses autres études mettent en évidence que les performances cognitives, notamment la vitesse de traitement, augmentent avec l'exercice physique (Adam, Teeken, Ypelaar, Verstappen & Paas, 1997 ; Collardeau et al., 2001). L'expérience de Deakin, Starkes, & Elliott (1988) étend ces observations aux enfants. Dans cette étude, des enfants de 8 et 11 ans et des jeunes adultes ont réalisé des tâches de détection visuelle en étant assis ou en marchant sur un tapis roulant à une vitesse entraînant l'élévation de leur rythme cardiaque à soixante-quinze pour cent de leur rythme cardiaque maximal. Les réponses des sujets furent toujours plus rapides en situation de double-tâche que lorsque les sujets étaient statiques. Ceci prouve bien que les enfants peuvent, eux aussi, améliorer leurs performances grâce à l'exercice physique. Cette amélioration notable, malgré la situation de double-tâche, serait due à une augmentation du niveau d'éveil imputable à l'exercice physique. Adam, et al. (1997 ; Humphreys & Revelle,

1984) définissent l'éveil comme une dimension conceptuelle générale allant de la somnolence à l'excitation extrême et s'exprimant en termes psycho-physiologiques, émotionnels et comportementaux. L'exercice physique, par l'élévation du rythme cardiaque et de la fréquence respiratoire, augmenterait le niveau d'éveil global, et celui-ci pourrait être disponible pour une tâche cognitive.

La plupart des études menées sur le lien entre cognition et exercice physique l'ont été dans le domaine de la psychologie du sport. Cependant, Schaefer, Lövdén, Wieckhorst & Linderberger (2010) ont cherché à tester l'hypothèse du gain cognitif dû à l'exercice physique au travers d'une tâche motrice plus proche de la réalité. En effet, Li, Krampe et Bondar (2005) avaient argumenté que les tâches motrices utilisées devaient mimer une situation de double-tâche de la vie quotidienne. Ainsi, Schaefer et al. ont demandé à des enfants de 9 ans et à des adultes de réaliser une tâche de reconnaissance de chiffres (parmi une série entendue précédemment) en étant assis sur une chaise ou en marchant sur un tapis roulant. Le tapis roulant pouvait fonctionner soit à une vitesse fixée par l'expérimentateur soit à une vitesse choisie par le sujet. Les résultats montrent que les sujets ont effectivement augmenté leurs performances à la tâche cognitive dans les situations de double-tâche. De plus, cette amélioration était plus marquée dans la condition où les sujets marchaient à leur vitesse préférée, vitesse qu'ils avaient eux-mêmes déterminée. Cet effet est plus marqué chez les enfants que chez les jeunes adultes. Les auteurs concluent donc que leur étude conforte l'idée que l'exercice physique augmente le niveau d'éveil disponible, lequel peut alors être utilisé dans la réalisation de la tâche cognitive et que les enfants peuvent bénéficier eux aussi de cet apport accru d'activation disponible.

A notre connaissance, aucune étude n'a testé si ce lien entre cognition et activité motrice existait chez le jeune enfant. Si ce lien existe, alors mettre l'enfant en activité motrice durant la tâche de MDT que nous allons lui proposer pourrait peut-être l'aider à augmenter le niveau d'attention disponible pour la tâche elle-même. Les performances de rappel pourraient alors être améliorées.

Le troisième objectif de travail de thèse était donc de tester si la motricité pouvait être facilitatrice dans une tâche de MDT chez les jeunes enfants et si, pour cela, il était nécessaire qu'elle soit orientée vers un indice visuel relié sémantiquement au but de la tâche.

Ainsi fait, se mettre en action pour se rendre à ce qui va permettre d'accomplir la tâche pourrait aider à maintenir le but de l'activité en mémoire.

5. Présentation de la recherche

Les études expérimentales menées sur la capacité de la MCT et les résultats qui en ont émergé ont conduit les chercheurs à élaborer le concept de MDT (Baddeley et Hitch, 1974). Ce composant majeur de la pensée se rapprocherait d'un focus attentionnel pouvant maintenir une quantité d'informations limitée en mémoire afin de réaliser un traitement sur ces données, lequel peut se révéler très complexe. La MDT est donc limitée par le nombre des éléments qu'elle peut maintenir (limite spatiale), par le temps durant lequel elle peut les maintenir (limite temporelle) et par l'énergie qu'elle peut consacrer au maintien et au traitement (limite énergétique). L'étude de la MDT, et par là-même des limites qui en contraignent son fonctionnement, est particulièrement pertinente chez les jeunes enfants car il existe des liens très forts entre l'efficacité de la MDT et la construction des habiletés scolaires. Comprendre le fonctionnement de la MDT, c'est progresser dans la compréhension des désordres développementaux et éducatifs et ainsi pouvoir proposer des remédiations, voire prévenir des difficultés. Or, du fait du manque de paradigme adapté à l'étude des enfants entre 2 et 6 ans, mais aussi des difficultés à avoir accès à de larges populations de jeunes enfants dans les pays anglo-saxons, où la majeure partie des études existantes ont été conduites, la MDT a été peu étudiée dans son fonctionnement dans ce groupe d'âge. *Le premier objectif de cette recherche a donc été de créer un paradigme d'étude des enfants entre 2 et 6 ans.* La genèse de l'élaboration de ce paradigme ainsi que les résultats de l'exploration auprès de sujets de 5 ans seront présentés dans le chapitre 6, au sein de la partie expérimentale. Ce paradigme a ensuite été testé auprès de plus larges échantillons et auprès d'enfants de 2 à 6 ans.

Parce que les enfants n'utilisent pas spontanément de stratégie de maintien de l'information avant 7 ans (Camos et Barrouillet, 2011), la période de 2 à 6 ans est particulièrement adaptée pour observer s'il y a un déclin temporel de l'information en mémoire. Ainsi, *le deuxième objectif de cette recherche était d'étudier le déclin temporel de l'information et notamment d'explorer si la vitesse de déclin change ou non durant l'enfance.* Le temps s'écoulant entre la présentation du modèle et la réalisation par l'enfant a donc été manipulé au cours de toutes les expériences conduites au cours de cette thèse. Les expériences 2, 3 et 4 ont spécifiquement étudié le déclin temporel de l'information en

mémoire en ne manipulant que le facteur du délai entre la présentation du modèle et la réalisation par l'enfant. Les résultats de ces trois expériences, menées auprès d'enfants de 2 ans à 3 ans et demie d'une part et de 4 à 6 ans d'autre part, seront rapportés dans le chapitre 7 au sein de la partie expérimentale.

D'autre part, il est connu que la MDT se développe rapidement durant la petite enfance notamment du fait de la maturation neuronale, gagnant ainsi en rapidité et en qualité d'exécution. Pour autant, les capacités attentionnelles et particulièrement le contrôle attentionnel restent très limités chez les jeunes enfants. Notamment, les jeunes enfants ont des difficultés à se représenter et à maintenir le but de l'activité en mémoire ce qui pourrait expliquer leur faibles performances, par exemple dans la tâche du DDCS avancé. De nombreuses études ayant montré par ailleurs le bénéfice cognitif que pouvait représenter l'activité motrice menée durant une tâche de MDT, *le troisième objectif de cette recherche était d'explorer si la mise en œuvre d'une activité motrice pouvait aider le jeune enfant à maintenir le but en mémoire et donc à mettre en œuvre une stratégie de maintien de l'information et si, pour cela, elle nécessitait d'être visuellement orientée vers un indice rappelant le but de la tâche.* Nous avons donc manipulé l'introduction d'une tâche motrice ainsi que son orientation vers un indice visuel relié sémantiquement au but de la tâche. Les procédures des deux expériences menées en ce sens et leurs résultats seront rapportés dans le dernier chapitre de la partie expérimentale.

5.1. Création d'un paradigme pour l'étude des jeunes enfants

Le premier chapitre de la partie expérimentale rapporte la première étude conduite dans le cadre de cette thèse. Ce premier travail visait à combler un manque constaté dans la littérature sur la MDT chez l'enfant, c'est-à-dire la quasi absence de paradigme d'étude du fonctionnement de la MDT adapté à l'enfant entre 2 et 6 ans. Les paradigmes utilisés auprès des bébés et jusqu'à 24 mois visent plutôt à mesurer la capacité de rétention des informations. Ainsi, la tâche de réponse différée, par exemple, quantifie le temps durant lequel un enfant va maintenir en mémoire l'emplacement d'un objet. C'est l'action de l'enfant en direction de cet objet à la fin du délai d'attente imposé par l'expérimentateur qui détermine que l'information était encore présente, ou non, en MDT. Les paradigmes utilisés avec des enfants plus âgés sont quant à eux inexploitable avec des jeunes enfants car ils

font appel à des compétences que les jeunes enfants ne maîtrisent pas (i.e., lecture, calcul) ou trop peu (i.e., dénombrement).

Le paradigme que nous avons à élaborer se devait donc de mettre en œuvre une tâche simple pour que des enfants aussi jeunes que 2 ans puissent le comprendre et l'exécuter. De plus, il ne fallait pas que la réponse à donner soit verbale afin de ne pas biaiser les résultats par le niveau langagier des enfants, lequel varie énormément entre 2 et 6 ans et même entre les enfants d'un même âge. Et, afin de maintenir l'attention de ces jeunes enfants sur la tâche à réaliser, il était nécessaire qu'ils soient actifs durant la passation. Ainsi, nous avons proposé aux enfants de « faire les courses comme maman » en empilant des fruits en plastique dans des sacs transparents à l'identique du modèle réalisé sous leurs yeux par l'expérimentateur.

Pour que notre paradigme soit valable, outre le fait que la tâche soit réalisable par les jeunes enfants, il s'avérait primordial qu'il soit sensible. En d'autres termes, il devait rendre compte de la manipulation de facteurs liés aux limites de la MDT, capacité en termes de nombres d'items pouvant être maintenus, temps entre présentation du modèle et réalisation par l'enfant et charge attentionnelle de la tâche concurrente. Ainsi, nous avons tout d'abord manipulé le nombre d'items à rappeler. Si notre tâche était suffisamment sensible, alors les performances des enfants devraient diminuer avec l'augmentation du nombre d'items à maintenir. De ce fait, nous faisons l'hypothèse que les performances allaient diminuer avec le nombre de fruits à rappeler. D'autre part, nous avons fait varier le délai entre la présentation du modèle et la réalisation par l'enfant, celle-ci pouvant être immédiate ou différée de 5 secondes. Si les traces mémorielles déclinent en mémoire avec le temps, alors leur niveau d'activation devrait être inférieur dans le cas d'un rappel différé. Nous faisons donc l'hypothèse que les performances diminueraient au cours du temps. Enfin, pour tester la sensibilité du paradigme à la limite attentionnelle de la MDT, nous avons manipulé l'introduction d'une tâche concurrente au maintien. Si le paradigme est suffisamment sensible, alors les performances de rappel devraient diminuer avec l'introduction d'une tâche secondaire concurrente au maintien. En outre, dans un but exploratoire, nous avons fait varier la charge attentionnelle de la tâche secondaire (i.e., modérée ou élevée) pour observer son impact sur les performances de rappel des enfants.

Finalement, notre paradigme s'apparentait à un paradigme Brown-Peterson (Brown, 1958 ; Peterson & Peterson, 1959) adapté par sa mise en œuvre et le matériel utilisé à des jeunes enfants. Ce paradigme a ainsi été utilisé auprès de 37 enfants de 5 ans. La procédure et les résultats seront présentés dans le premier chapitre de la partie expérimentale.

5.2. Le déclin temporel de l'information chez les jeunes enfants

Les deux expériences rapportées dans le deuxième chapitre de la partie expérimentale avaient pour but de tester le déclin temporel de l'information en mémoire et d'étendre l'application de notre paradigme à des enfants d'âge compris entre 2 et 6 ans. Le déclin temporel de l'information en mémoire a été beaucoup étudié à partir des paradigmes traditionnels alliant maintien et traitement de l'information. Cependant, dans les études menées principalement chez les adultes, alors que certains auteurs réussissent à mettre en évidence le déclin temporel, d'autres mettent en évidence qu'il n'existe pas. Barrouillet et al. (2004) ont d'ailleurs fait l'hypothèse que cela pourrait être dû à un contrôle insuffisant du paramètre temporel durant l'exécution de la tâche concurrente. L'attention ne serait pas suffisamment engagée vers le traitement et cela autoriserait le sujet à opérer subrepticement un déplacement de l'attention du traitement vers les traces à maintenir, évitant par cela leur déclin. L'étude du déclin chez le jeune enfant ne devrait pas souffrir de ces difficultés méthodologiques. En effet, selon Camos et Barrouillet (2011), les enfants avant 7 ans n'utiliseraient pas spontanément de stratégie de maintien. Il ne serait donc pas nécessaire d'introduire une tâche concurrente au maintien pour observer le déclin temporel, s'il existe. Ainsi, nous avons manipulé un unique facteur dans ces deux expériences, le délai entre la présentation du modèle par l'expérimentateur et la réalisation par l'enfant. Bien sûr, conformément aux données de la littérature sur l'augmentation développementale de l'empan en mémoire, on s'attendait à ce que les performances de rappel augmentent avec l'âge. D'autre part, s'il y a déclin temporel, alors les traces mémorielles devraient s'amenuiser avec le temps, rendant de plus en plus difficile le rappel des informations maintenues. Notre hypothèse était donc que les performances allaient diminuer au fur et à mesure du passage du temps et ce, à tous les âges. Cependant, on pouvait s'attendre à ce que les enfants plus âgés construisent des représentations en mémoire plus actives ou plus fortes que les enfants plus jeunes, les capacités d'encodage évoluant avec l'âge. Il pourrait

être possible aussi que les enfants les plus âgés mettent en œuvre des mécanismes de maintien et réussissent ainsi à contrecarrer l'oubli dû au temps. Dans ce cas, le déclin temporel devrait être plus fort chez les enfants jeunes. L'exploration du déclin temporel avec des enfants de 2 à 6 ans devait donc nous permettre de définir, et ce pour la première fois, si la vitesse de déclin de l'information change au cours du développement des jeunes enfants.

Ainsi, l'Expérience 2 rapportera les résultats concernant 96 enfants de 4 à 6 ans, et l'Expérience 3 ceux de 56 enfants de 2 ans à 3 ans et demie testés au travers du paradigme original de la marchande. L'Expérience 4 rapportera les résultats obtenus au travers d'un autre paradigme original, la course de ski des poupées, testé auprès de 84 enfants de 4 à 6 ans. Ce nouveau paradigme a été introduit dans le but de conforter les résultats obtenus précédemment tout en résolvant des difficultés méthodologiques soulevées par les expériences 1, 2 et 3.

5.3. Impact de la motricité sur le maintien du but

Toute tâche de MDT est une activité orientée vers un but, et toute activité orientée vers un but ne peut aboutir que si le sujet n'oublie pas le but de la tâche durant son exécution. Or, les jeunes enfants ont justement des difficultés à se représenter le but de l'activité en mémoire et surtout à le maintenir durant le temps de l'exécution de la tâche. Le maintien du but est donc cognitivement coûteux chez le jeune enfant. D'autre part, Camos et Barrouillet (2011) ont fait l'hypothèse que les enfants avant 7 ans n'utiliseraient pas spontanément de stratégie de maintien dans la situation de double-tâche car leurs capacités attentionnelles seraient entièrement mobilisées, ce qui bloquerait la mise en œuvre d'une stratégie de maintien. Nous avons donc cherché à alléger le coût cognitif du maintien du but en mémoire, c'est-à-dire proposer un contexte dans lequel il serait plus aisé pour l'enfant de maintenir le but de la tâche dans le module de but tel que décrit dans le modèle ACT-R (Anderson & Lebière, 1998). S'appuyant sur le fait que la motricité permet de soutenir les activités cognitives (Cook & Goldin-Meadow, 2006) et d'accroître le niveau d'éveil disponible pour des tâches cognitives (Schaefer et al., 2010 ; Adam et al., 1997) , nous avons introduit une tâche motrice, marcher en direction de l'étal de la marchande, dans notre paradigme d'évaluation de la MDT. D'autre part, tenant compte qu'un indice visuel peut aider le jeune enfant à activer, maintenir ou avoir accès au but en mémoire (Chevalier et Blaye, 2009 ;

Marcovitch, 2007, 2010) la tâche motrice pouvait s'orienter ou non, vers un indice visuel relié sémantiquement au but de la tâche. Le chapitre 8, au sein de la partie expérimentale, rapporte les deux expériences conduites avec l'introduction de la tâche motrice.

Dans l'Expérience 5, nous avons manipulé l'introduction d'une tâche motrice durant le rappel différé, ainsi que l'orientation ou la non-orientation de cette tâche motrice vers un indice visuel lié au but de la tâche (i.e. l'étal de la marchande). Nous avons aussi manipulé le délai s'écoulant entre la présentation du modèle par l'expérimentateur et la réalisation par l'enfant. Conformément à nos précédentes études, nous avons fait l'hypothèse que les performances devraient augmenter avec l'âge, mais diminuer avec le temps qui passe. L'introduction d'une tâche motrice durant le délai était le deuxième facteur manipulé, l'enfant devant attendre avant de prendre les fruits (i.e. activité motrice nulle) ou marcher jusqu'à la marchande par un trajet rectiligne permettant de voir l'étal ou par un chemin détourné rendant l'étal de la marchande non visible durant la marche. Si la motricité augmente le seuil d'activation disponible pour la tâche cognitive, alors les performances devraient être plus élevées dans les conditions où les enfants marchaient que dans la condition où ils étaient statiques. Enfin, si la vision du but est nécessaire durant l'activité motrice, alors les enfants devraient plus aisément maintenir le but quand ils voient l'étal de la marchande. Leurs performances devraient alors être plus élevées dans la condition où l'activité motrice est directement orientée vers l'indice lié au but de la tâche, i.e. quand l'indice visuel est visible par l'enfant, que lorsqu'elle est indirectement orientée. Les résultats concernant les 96 enfants de 4, 5 et 6 ans testés dans l'expérience 5 seront rapportés dans le chapitre 8, au sein de la partie expérimentale.

Dans l'Expérience 6, nous avons cette fois croisé les deux facteurs que sont le délai et la vision de l'indice lié au but de la tâche dans l'activité motrice. L'activité motrice engagée était, à l'opposé de l'expérience 5, tout à fait identique dans les 4 conditions différées afin que la planification motrice impliquée par la réalisation de cette tâche reste inchangée au travers des conditions différées. Comme précédemment, nous faisons l'hypothèse d'une augmentation des performances avec l'âge et de leur diminution au cours du temps. D'autre part, l'activité motrice mise en œuvre durant le délai consistait pour les enfants à marcher directement jusqu'à l'étal de la marchande lequel était visible ou invisible durant le trajet. Si

la vision d'un indice rappelant le but de la tâche est nécessaire pour placer le but de la tâche dans le module de but tel que défini par le modèle ACT-R, alors le fait de voir l'étal devrait être facilitateur. Dans ce cas, les performances devraient être supérieures dans les conditions où l'étal est visible que lorsqu'il ne l'est pas. Si l'acte moteur seul suffit à alléger la charge attentionnelle du maintien du but, alors les performances devraient être identiques dans les deux cas où l'activité motrice est engagée. Enfin, nous pensons que l'exécution d'une tâche motrice, pourrait permettre, par l'allègement du coût attentionnel du maintien du but, la mise en œuvre d'une stratégie de maintien de l'information. Celle-ci devrait permettre de contrecarrer, au moins en partie, l'oubli dû au temps qui passe. Ainsi, la manipulation du délai, permettra de tester si les enfants de 4 à 6 ans peuvent mettre en œuvre une stratégie de maintien grâce à l'activité motrice et, dans ce cas, à quel point l'activité motrice permet de contrecarrer l'oubli dû au temps qui passe. Les résultats des 96 sujets de 4 à 6 ans ayant expérimenté ce protocole seront présentés et discutés dans le chapitre 8, au sein de la partie expérimentale.

Ainsi ce travail de thèse rapporte les résultats obtenus à partir des données concernant plus de 450 enfants d'âge compris entre 2 et 6 ans. Le premier chapitre de la partie expérimentale rapporte la genèse, la méthodologie et les premiers résultats d'un paradigme original adapté à l'étude des jeunes enfants. Le paradigme de la marchande, inspiré de Brown-Peterson (Brown, 1958 ; Peterson & Peterson, 1959) et adapté aux jeunes enfants, est simple, concret et implique activement les enfants, ce qui leur permet de maintenir un bon niveau attentionnel. La suite du travail de thèse rapporte l'exploration du fonctionnement de la mémoire de travail à l'aide de ce paradigme et d'un autre, la course de ski des poupées, au travers de cinq expériences portant sur deux thèmes principaux. Le premier thème, exploré dans le deuxième chapitre de la partie expérimentale, porte sur le déclin des traces mémorielles au cours du temps, déclin qui apparaît linéaire et assez similaire au cours de la période d'âge explorée, soit de 2 à 6 ans. Le deuxième thème, présenté dans le troisième chapitre de la partie expérimentale, concerne l'impact de la motricité d'une part et de la vision d'un indice relié au but de la tâche durant l'exécution de la tâche motrice d'autre part, sur les performances de rappel en mémoire de travail des jeunes enfants. Enfin, la discussion générale permettra de mettre en perspective l'ensemble des conclusions et des résultats de ces études avec la littérature existante sur le sujet.

PARTIE EXPERIMENTALE

6. Création d'un paradigme pour l'étude des jeunes enfants

Le but de la première expérience rapportée dans ce travail de thèse était de répondre à un manque constaté dans la littérature. En effet, il existe peu de paradigmes permettant de tester le maintien à court terme des enfants entre 2 et 6 ans. Les paradigmes utilisés sont bien souvent adaptés de ceux utilisés chez les enfants plus jeunes ou au contraire plus âgés et ne tiennent pas compte des spécificités de cette tranche d'âge. Pour débiter ce travail de thèse, l'objectif était donc d'inventer un paradigme et de le tester, dans un premier temps, avec des enfants de 5 ans. Les deux sous-objectifs étaient que ce paradigme bien sûr soit réalisable par les jeunes enfants, mais aussi qu'il soit sensible, c'est-à-dire qu'il permette de rendre compte de variations dans le traitement engendrées par l'introduction de facteurs qui contraignent le maintien à court terme. Enfin, la création de ce paradigme était le point de départ des recherches menées ensuite dans le cadre de cette thèse, lesquelles sont présentées dans les chapitres 7 et 8 de cette partie expérimentale.

PROPOSER UNE TÂCHE REALISABLE

Les enfants de 2 à 6 ans ont deux caractéristiques qu'il était fondamental de prendre en compte pour concevoir un paradigme qui soit réalisable par l'ensemble des enfants de cette tranche d'âge. La première caractéristique est qu'ils ont des capacités attentionnelles et d'auto-motivation limitées. Ceci implique des conséquences notables. Tout d'abord, la tâche doit être attrayante pour que les enfants aient envie de l'investir et rapide de passation pour ne pas épuiser leurs capacités d'attention ce qui les désengage de la tâche. De plus, elle doit être concrète pour maintenir un niveau d'attention maximal. La seconde caractéristique des jeunes enfants est qu'ils ne maîtrisent pas ou très peu d'habiletés. Ils ne savent encore que très peu compter et calculer, ne lisent pas et leur niveau de langage est extrêmement variable. La conséquence est donc qu'il est nécessaire de concevoir une tâche où la réponse ne sera pas donnée oralement et ne dépendra pas d'habileté particulière.

Les tâches habituellement utilisées chez les bébés répondent d'ailleurs à la plupart de ces critères. Elles sont attrayantes, souvent concrètes en reprenant des situations que les bébés peuvent rencontrer dans la vie de tous les jours (e.g., recherche d'un jouet caché,

recherche de la mère ou comportement orienté vers elle, résolution de petits problèmes pour obtenir un objet convoité etc). De plus, ces tâches exigent de l'enfant des comportements simples et maîtrisés (e.g., orientation de la tête, geste de préhension etc). Ces paradigmes mesurent la plupart du temps la capacité de rétention de l'information dans son versant temporel : combien de temps l'enfant peut-il maintenir l'information de la position de l'objet avant de l'oublier, dans une tâche A non B par exemple ? Cependant, comme nous l'avons vu dans la partie théorique de cette thèse, ces tâches sont rapidement limitées pour étudier des enfants après 2 ans, et ce pour plusieurs raisons. La première raison est que l'augmentation développementale de la durée de rétention et de l'empan en mémoire est rapide dans la petite enfance. Ainsi, les tâches requérant de faire patienter l'enfant durant un temps de plus en plus long avant d'aller chercher un jouet, comme par exemple dans la tâche de réponse différée, ne sont plus adaptées après deux ans car les enfants plus grands se lassent de l'attente devenue trop longue. D'autre part, dans des tâches telles que *Spinning Spots*, le nombre d'emplacements à prévoir pour éviter un effet plafond devient très vite trop important pour que la tâche soit encore réalisable. La deuxième raison pour laquelle ces tâches ne sont plus adaptées aux enfants après deux ans est que les mesures utilisées ne sont plus pertinentes à cet âge (e.g., orientation de la tête, temps de succion, temps écoulé etc.). Enfin, la troisième raison de leur limitation est que ces tâches ne permettent pas la manipulation de facteurs qui pourraient amener à cerner le fonctionnement de la mémoire de travail. Elles ne permettent d'évaluer qu'un aspect du maintien à court terme, i.e. la durée de rétention. Néanmoins, l'étude du maintien à court terme de l'information étant l'un des objectifs de cette thèse, notre paradigme s'inspirera des tâches proposées à ces très jeunes enfants.

Les tâches proposées aux enfants plus grands, c'est-à-dire à partir de 6 ou 7 ans, permettent quant à elles de nombreuses manipulations de facteurs (e.g., temps de présentation et/ou de rétention, nombre d'items présentés, fréquence de présentation, nature des items, degré d'interférence etc.). Ce faisant, leur utilisation mène à une meilleure compréhension des mécanismes à l'œuvre dans la réalisation des tâches de mémoire de travail. Les tâches concernées sont les tâches d'empan inverse opérées sur différents matériels (e.g., chiffres, lettres, mots, non-mots, positions spatiales etc.), et les tâches d'empan complexe telles que les tâches d'empan de lecture, de comptage, d'écoute, de

calcul, ainsi que les tâches incluant un contrôle plus exigeant du temps comme la tâche de Brown-Peterson (Brown, 1958 ; Peterson & Peterson, 1959).

Toutes ces tâches, quoi que fort intéressantes, ne peuvent être proposées aux jeunes enfants. De rares auteurs ont tenté d'utiliser les tâches d'empan inverse avec des enfants aussi jeunes que 5 ans (Hitch et al. 1988) ou des tâches d'empan simple à des enfants de 2 et 3 ans (Gathercole et Adams, 1993). Toutefois, dans cette dernière étude la moitié de l'échantillon a été éliminée du fait que les enfants ne réalisaient pas entièrement le test. D'autres rares auteurs ont utilisé des situations de double tâche pour évaluer des enfants à partir de 4 (de Ribaupierre, Neiryck, & Spira, 1989) ou 5 ans (de Ribaupierre et Bailleux, 1994 ; Halford et al. 1994). Mais ces études restent des exceptions. En effet, ces épreuves s'opèrent sur du matériel abstrait (e.g., stimuli auditifs, emplacements spatiaux) et nécessitent donc une vraie motivation des enfants pour être exécutées, motivation dont les jeunes enfants disposent en quantité limitée. D'autre part, la réalisation des tâches d'empan complexe demande la maîtrise d'habiletés peu ou non maîtrisées par les jeunes enfants. Enfin, la réalisation de la tâche se fait généralement à l'aide d'une réponse donnée oralement, or le niveau de langage des enfants entre 2 et 6 ans varie beaucoup avec l'âge mais aussi entre les individus d'un même groupe d'âge. Ainsi, un enfant de 3 ans peut ne s'exprimer que par mots-phrases (e.g., « papa » pour dire « papa est rentré du travail»), ou parler avec des phrases déjà syntaxiquement correctes dès cet âge, avec un défaut de prononciation ou non. La réponse orale n'est donc pas adaptée lorsqu'on étudie des enfants entre 2 et 6 ans car le biais dû à la maîtrise du langage serait beaucoup trop important.

Ainsi, à cet âge où l'essentiel des activités se fait dans l'échange corporel avec l'environnement, il nous a semblé pertinent d'imaginer une tâche où l'enfant construit lui-même sa réponse au-travers d'une action concrète sur l'environnement, méthodologie rejoignant d'ailleurs les mises en situation piagétienne (1924, 1941). C'est pourquoi, l'enfant a été invité à « faire les courses comme maman » en empilant lui-même des fruits en plastique dans un sac transparent, à l'identique du modèle présenté par l'expérimentateur. Cette tâche est attrayante car elle utilise un matériel coloré constitué de jouets. Elle est aussi concrète car l'enfant y reconnaît une situation familière. De plus, elle aide au maintien de l'attention par l'implication effective motrice de l'enfant dans la

construction de sa réponse. On notera qu'Istomina (1948, 1977) avait introduit un paradigme similaire à celui-ci. Elle avait ainsi démontré qu'entre 3 et 7 ans, les enfants ont des performances de rappel plus élevées dans une situation de jeu par rapport à une situation de test de laboratoire. Cependant, les conclusions d'Istomina sont encore objet de débat du fait que plusieurs auteurs n'ont pas réussi à répliquer ses résultats (Reese, 1999 ; Schneider & Brun, 1987 ; Weissberg & Paris, 1986). De plus, notre tâche est bien différente de celle utilisée par cette auteure sous au moins deux aspects fondamentaux. Tout d'abord, nous n'avons pas utilisé le contexte de la marchande en comparaison avec un autre contexte et n'avons pas étudié cette situation de test pour elle-même. La tâche n'a été qu'un support, un cadre de jeu utilisé pour maintenir l'attention et la motivation des plus jeunes enfants pour la tâche. Deuxièmement, contrairement à la tâche proposée par Istomina, les enfants n'ont pas eu à demander à l'expérimentateur les produits à acheter (i.e., des fruits en plastique), mais ils les introduisaient eux-mêmes dans le sac prévu à cet effet. Ainsi, les enfants n'ont pas eu à utiliser des codes verbaux pour effectuer la tâche ce qui a réduit l'impact des compétences langagières sur les performances de rappel. Les conditions semblaient réunies pour que la tâche soit réalisable par les jeunes enfants. Le second objectif de ce premier travail de thèse était que la tâche soit sensible, c'est-à-dire qu'elle permette de rendre compte de variations dans le traitement engendrées par l'introduction de facteurs qui contraignent le maintien à court terme.

PROPOSER UNE TÂCHE SENSIBLE

La mémoire de travail est limitée selon trois aspects principaux, temporellement, spatialement et énergétiquement. L'objectif visé par la création du paradigme était de pouvoir manipuler ces facteurs au travers de la tâche afin d'améliorer notre compréhension du fonctionnement de la MDT chez le jeune enfant. Ainsi, il était nécessaire que notre tâche soit sensible, c'est-à-dire qu'elle rende compte de la manipulation de facteurs liés aux limites même de la MDT, temporelle, spatiale et énergétique. Ainsi, le délai entre la présentation du modèle et la réalisation par l'enfant a été manipulé, de même que l'introduction d'une tâche concurrente ou interférente au maintien, et la charge attentionnelle de cette tâche concurrente.

6.1. Introduction d'un délai : notion de contrainte temporelle en MDT

La limite temporelle se retrouve dans chacun des trois modèles de MDT évoqués dans la partie théorique, le modèle à Composantes Multiples de Baddeley, le modèle des Processus Emboîtés de Cowan et le modèle de Partage Temporel des Ressources de Barrouillet et al. En effet, chacun de ces auteurs considère que le niveau d'activation des traces mémorielles diminue progressivement avec le temps jusqu'à devenir inaccessibles si rien n'est fait pour les réactiver, comme par exemple les répéter (i.e., répétition subvocale) ou les cibler à travers le focus attentionnel (i.e., rafraîchissement attentionnel). Une représentation ne peut donc rester suffisamment active (i.e., accessible) que durant un temps très court. Cette source d'oubli en MDT ou MCT est appelé déclin temporel. Dès le début des recherches sur le déclin en mémoire de travail, certains chercheurs parviennent à le mettre en évidence (Baddeley, Thomson & Buchanan, 1975) alors que d'autres n'y parviennent pas (Keppel & Underwood, 1962 ; Waugh & Norman, 1965). Encore aujourd'hui, l'origine de l'oubli en MDT ou MCT reste le terrain d'un immense débat. Certains auteurs défendent l'idée que les traces mémorielles disparaissent peu à peu avec le temps qui passe (Barrouillet, Bernardin, & Camos, 2004 ; Cowan & Aubuchon, 2008 ; Mueller, Seymour, Kieras & Meyer, 2003 ; Towse et Hitch, 1995). D'autres auteurs argumentent que l'oubli proviendrait davantage des interférences induites par les représentations émanant du traitement en cours dans la tâche concurrente au maintien (Lewandowsky, Oberauer, & Brown, 2009 ; Berman, Jonides, & Lewis, 2009 ; Nairne, 1990). Une des raisons de cette difficulté à conclure sur l'existence du déclin temporel des traces mémorielles est liée au fait que les paradigmes utilisés pour l'évaluer, principalement chez l'enfant à partir de 7 ans et les adultes, mettent en jeu une tâche distractive. Cette tâche, dont la charge attentionnelle peut varier, est nécessaire pour contrecarrer la mise en œuvre des mécanismes de maintien de l'information, comme la répétition subvocale ou le rafraîchissement attentionnel. Ce n'est effectivement que lorsque les traces mémorielles ne sont plus réactivées que le déclin temporel, s'il a lieu, peut être mesuré. Or la tâche distractive crée inmanquablement des représentations en mémoire qui interfèreraient avec les représentations à maintenir.

Ainsi, le paradigme présenté ici se propose-t-il d'évaluer l'impact d'un délai entre la

présentation du modèle et la réalisation de la tâche. Durant le délai, une tâche distractive, interférente au maintien a été introduite. Le délai était donc une simple attente (l'enfant devait attendre que le magasin ouvre) ou était combiné à l'exécution d'une tâche interférente, concurrente au maintien (i.e., marche en direction de l'étal de la marchande). Si notre paradigme est suffisamment sensible, et qu'il rend donc compte de l'introduction d'un délai entre la présentation du modèle et le rappel, les performances devraient être inférieures dans le cas d'un rappel différé.

6.2. Introduction d'une tâche concurrente : notion de contrainte spatiale en MDT

La limite spatiale en MCT ou MDT se conçoit différemment selon que l'on se réfère à un modèle spécifique ou général. Dans le modèle spécifique à composantes multiples de Baddeley (1986), la limite spatiale renvoie à la capacité du système périphérique de stockage. Ainsi, la limite spatiale concernant les informations langagières réfère à la quantité d'informations qui peuvent être stockées dans la boucle phonologique. Dans les modèles généraux, comme dans le modèle des processus emboîtés de Cowan (1999) ou encore dans le modèle de partage temporel des ressources (Barrouillet et al., 2004), la limite spatiale renvoie au nombre d'informations qui peuvent être actives, et donc récupérables, à un instant t . Cowan (1999) évalue à quatre le nombre d'informations pouvant être présentes dans le focus attentionnel, et donc actives, à un instant t . Les études de Vergauwe, Barrouillet et Camos (2010) confirment que le nombre d'informations pouvant être suffisamment activées pour être récupérables à un instant t serait de 4 éléments. Cependant, la notion « d'espace occupé » par les informations à retenir ne suffit pas, à elle seule, à comprendre l'impact de l'introduction d'une tâche concurrente au maintien. Les modèles généraux de MDT (Cowan, 1999 ; Barrouillet et al., 2004) postulent que maintien et traitement se partagent un même pool de ressources cognitives. De là, deux hypothèses ont été avancées pour expliquer l'impact de l'introduction d'une tâche concurrente au maintien sur la capacité en MDT, dans une tâche d'empan de comptage.

La première hypothèse est de défendre que plus le traitement est volumineux et

moins il reste d'espace disponible pour les informations à retenir. C'est l'hypothèse de Case et al. (1982, 1985). L'espace total de traitement est partagé en deux parties dont la taille relative peut varier l'une par rapport à l'autre. Une des parties est dédiée au maintien alors que l'autre partie est dédiée au traitement. Si le traitement est moins volumineux, c'est-à-dire s'il demande moins de ressources cognitives, alors il laissera davantage d'espace pour le maintien des informations. Les auteurs expliquent ainsi l'augmentation développementale de l'empan dans une tâche d'empan de comptage. Avec l'âge, les enfants deviennent de plus en plus experts en comptage, diminuant ainsi le coût cognitif du traitement lié au comptage. L'espace disponible pour le stockage augmente en conséquence avec l'âge et, par là-même l'empan lui-même.

La deuxième hypothèse est de proposer que c'est la rapidité du traitement qui est en jeu dans l'augmentation développementale de l'empan de comptage. Cette hypothèse proposée par Towse et Hitch (1995) est en lien avec le déclin temporel des traces mémorielles. Avec l'âge, les enfants deviennent de plus en plus experts en comptage et donc, de plus en plus rapides aussi à effectuer la tâche. Ils peuvent alors récupérer les traces mémorielles plus rapidement que les enfants plus jeunes. Ils augmentent ainsi leurs performances de rappel puisque le niveau d'activation des traces mémorielles est plus élevé au moment de la récupération et qu'elles ont donc plus de chances d'être efficacement récupérées en mémoire.

Barrouillet et Camos (2001) ont réalisé une étude comparant les performances d'enfants de 6, 8 et 11 ans dans une tâche de counting span vs baba span. Dans la tâche d'empan de comptage, les sujets devaient compter à haute voix le nombre de points présents sur une carte tout en mémorisant les lettres présentées entre les cartes. Dans la tâche de baba span réalisée trois semaines plus tard, les enfants devaient dire « baba » durant la présentation de cartes blanches présentées entre les lettres à mémoriser selon le même protocole que précédemment. L'originalité de ce paradigme consistait dans le fait que les auteurs ont contrôlé le temps de traitement lié à la tâche interférente en demandant aux sujets de dire « baba » durant le temps qu'ils leur avaient été nécessaire préalablement pour réaliser la tâche d'empan de comptage. A partir des résultats obtenus, ils argumentent que les deux explications évoquées jusqu'à présent pour expliquer l'augmentation

développementale de l'empan de comptage (i.e. déclin et vitesse de traitement vs coût du traitement) ne s'excluent pas mutuellement. En effet, ils ont observé que les enfants de 8, 11 et même 6 ans n'ont pas de meilleures performances en baba span qu'en counting span quand le temps qui s'écoule entre présentation des stimuli et rappel est maintenu constant. Ce résultat va à l'encontre des hypothèses de Case et al. (1982, 1985) et conforte celles de Towse et Hitch (1995). Les performances ne sont pas liées au coût du traitement et donc à la quantité de ressources disponibles pour le stockage mais elles sont fonction du temps. Par contre, les auteurs ont observé qu'à 9 et 11 ans, les performances de rappel sont inférieures dans une tâche d'opération span qu'en baba span et que cet écart diminue avec l'âge. Dans cette tâche d'empan de comptage, les sujets devaient juger le résultat (i.e., vrai ou faux) d'une addition à 2 ou 3 opérandes simples durant les épisodes de traitement situés entre la présentation des lettres à mémoriser. Cette tâche est plus difficile à 9 ans qu'à 11 ans du fait de l'amélioration des stratégies de comptage et de l'automatisation de la récupération en mémoire des résultats additifs. Ainsi, les performances ont augmenté avec la diminution du coût du traitement lié au calcul, soit du coût cognitif de la tâche. Ces derniers résultats confortent donc les hypothèses de Case et al. (1982, 1985) et mettent à mal celles de Towse et Hitch (1995). En conclusion de cette étude, on peut dire qu'il y aurait bien deux types de limitations en mémoire de travail. La première est liée au laps de temps pendant lequel une représentation peut être maintenue active en mémoire. La deuxième est liée au pool de ressources commun (focus attentionnel) disponible pour le traitement et le stockage. D'ailleurs, de plus en plus de modèles théoriques (Baddeley, 2000 ; Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004 ; Cowan, 1995, 1999 ; Engle & Oransky, 1999 ; ACT-R d'Anderson, 1993) permettent de prendre en considération ces deux types de limites en les combinant pour comprendre le fonctionnement complexe de la mémoire de travail.

En conclusion, si le paradigme de la présente étude est suffisamment sensible, alors on devrait observer une diminution de l'empan lorsqu'une tâche concurrente vient interférer avec le maintien comparativement à la condition où le rappel est différé sans tâche concurrente. Toujours dans l'optique de proposer une situation proche de ce que les enfants peuvent rencontrer dans la vie quotidienne et nous appuyant sur les résultats de Portrat, Camos et Barrouillet (2010), la tâche concurrente consistait donc à marcher jusqu'à l'étal de la marchande pour prendre les fruits. Portrat et al. ont en effet montré qu'il y a

interférence entre l'activité motrice et la mémoire verbale et que l'introduction d'une tâche secondaire motrice nécessitant d'être planifiée (i.e., déplacer sa main jusqu'au clavier de l'ordinateur pour appuyer sur une touche) entraîne la diminution des performances de rappel dans une tâche d'empan de MDT. Ainsi, si notre paradigme est suffisamment sensible, les performances de rappel devraient diminuer en rappel différé avec l'introduction d'une tâche secondaire motrice, concurrente au maintien (i.e., marcher jusqu'à l'étal de la marchande).

D'autre part, du fait de la troisième limite de la MDT, i.e. la limite énergétique, l'impact de la charge cognitive de la tâche concurrente au maintien a lui-aussi été testé.

6.3. Charge attentionnelle de la tâche concurrente : notion de limite énergétique en MDT

Pour que des informations soient activées en MDT, il faut que le sujet s'efforce de maintenir ces informations et que, dans le même temps, il inhibe celles qui ne sont pas pertinentes dans la tâche qu'il doit réaliser. Selon Engle et al. (1999) « la capacité de mémoire de travail » concerne « la capacité d'attention contrôlée, soutenue, face à de l'interférence ou de la distraction » (p.104, en italique dans le texte original). C'est le cas par exemple dans la tâche bien connue de Stroop (1935). Dans la version la plus simple de cette tâche, on présente au sujet des mots écrits en couleur. La couleur d'écriture des mots peut être congruente (i.e., le mot « bleu » écrit en bleu) ou non congruente avec le mot lui-même (i.e., le mot « bleu » écrit en vert). La tâche des sujets est de nommer la couleur dans laquelle le mot est écrit. Dans la condition congruente, les sujets sont plus rapides à donner la réponse et font moins d'erreurs que dans la condition non congruente où il est nécessaire d'inhiber la réponse liée au mot lu, par exemple le mot « bleu » lorsque ce mot est écrit en vert. Il a été montré que les sujets ayant de faibles capacités en MDT font davantage d'erreurs et sont plus lents à inhiber la réponse lue que ceux ayant des capacités en MDT plus élevées (Kane & Engle, 2003). Ceci se vérifie d'autant plus que le mot est apparenté à la couleur de l'encre qu'il faut nommer. On peut supposer que les sujets qui ont de faibles capacités en MDT sont aussi ceux qui ont le moins d'énergie disponible au service du

contrôle attentionnel.

La limite énergétique de la MDT renvoie effectivement à la quantité d'attention disponible chez le sujet et au contrôle que le sujet peut effectuer sur la focalisation de l'attention. Dans le modèle à Composantes Multiples (Baddeley, 2004) comme dans celui de Shallice (1986), la limite énergétique renvoie au contrôle exercé par le centre exécutif, ou le système attentionnel superviseur, sur les systèmes esclaves périphériques. En effet, le centre exécutif déploie et gère les stratégies de maintien de l'information, coordonne et supervise les informations provenant des systèmes esclaves, contrôle le flux des informations présentes en MDT et planifie la mise en œuvre des activités cognitives se déroulant simultanément. Ainsi, si la quantité d'attention disponible est limitée, comme chez le jeune enfant, alors c'est bien le contrôle exercé par le centre exécutif qui est moins efficient. L'ensemble des activités cognitives gérées par le centre exécutif sont donc moins bien contrôlées et, de fait, moins performantes. Dans le modèle des Processus Emboîtés (Cowan, 1999), la limite énergétique est, là aussi, particulièrement importante. Elle renvoie à la quantité d'attention disponible dans le système. Cette attention peut être focalisée consciemment, par un mécanisme cognitivement coûteux, sur des traces mémorielles et ce, en fonction des buts fixés en mémoire. Mais l'attention peut aussi être dévolue à l'inhibition des traces mémorielles automatiquement activées via le buffer sensoriel et faisant irruption dans le système. Ainsi le contrôle attentionnel, en assurant l'équilibre entre l'activation des traces pertinentes pour la tâche en cours et l'inhibition des informations non pertinentes, est la clé de voûte des activités cognitives. La limite énergétique est donc particulièrement importante chez les enfants (Cowan, 1999) car ils ont des capacités attentionnelles limitées. Enfin, dans le TBRS (Barrouillet et al. 2004), la limite énergétique renvoie elle aussi à la capacité attentionnelle du sujet et à l'efficacité de sa mise en œuvre, c'est-à-dire à l'efficacité du contrôle attentionnel. En effet, l'attention se partage alternativement entre maintien et traitement, ne pouvant se focaliser que sur un seul élément à la fois (Garavan, 1998 ; Oberauer, 2002, 2005). Ainsi, la quantité d'attention du système détermine l'énergie disponible pour l'activation des traces mémorielles tandis que l'efficacité du contrôle attentionnel détermine la possibilité de la mise en œuvre d'une alternance efficace entre maintien et traitement. D'ailleurs, le contrôle de l'attention augmente avec l'âge, notamment entre 3 et 5 ans, comme le montrent Les études des dernières décennies,

qu'elles soient comportementales (Bjorklund & Harnishfeger, 1990) ou basées sur la neuroimagerie (Posner, 2004). Les lobes frontaux ont une maturation lente durant l'enfance et leur capacité à maintenir l'attention augmente en conséquence (Kane & Engle, 2002). Un certain nombre de fonctions exécutives interviennent dans ce que l'on nomme « mémoire de travail » comme maintenir un but (Kane, Bleckley, Conway & Engle, 2001), mettre à jour le contenu de la mémoire de travail (Oberauer, 2005), alterner entre deux tâches (*switching*) et inhiber les informations non pertinentes (Friedman, Miyake, Corley, Young, DeFries & Hewitt, 2006).

Dans une étude de 2007, Wolfe et Bell ont mis en évidence que l'activité électrique cérébrale, mesurée à l'aide d'un électroencéphalogramme, change entre 3 ans et demi et 4 ans face à une tâche de mémoire de travail et de contrôle inhibiteur. Elle passe d'une activation diffuse à une activation de plus en plus localisée. De plus, ils ont observé que l'effort de contrôle, c'est-à-dire la capacité à supprimer une réponse dominante au profit d'une réponse non dominante (comme dans la tâche de Stroop, 1935), est sous la dominance du cortex frontal médial. Ce dernier se développe lentement durant la petite enfance. Ils ont observé par ailleurs qu'il y a une corrélation positive entre l'effort de contrôle et les performances aux tâches de mémoire de travail. Finalement, lorsque le contrôle attentionnel est moins coûteux, les performances dans les tâches de mémoire de travail s'améliorent. La maturation du cortex permet donc d'expliquer, tout au moins en partie, l'augmentation des performances de la mémoire de travail avec l'âge.

Ce qui semble donc prépondérant chez le jeune enfant est la faiblesse du contrôle attentionnel. Celle-ci semble en effet être la cause d'une absence d'alternance entre maintien et traitement du fait d'un contrôle attentionnel encore trop limité (Camos & Barrouillet, 2011 ; Bayliss et al., 2005 ; Cowan et al., 1994). Comme l'ont montré Barrouillet, Gavens, Vergauwe, Gaillard et Camos (2009, Expérience 3), l'introduction d'une tâche secondaire (i.e. nommer la couleur de bonhommes entre deux dessins dont le nom est à mémoriser) impacte les performances de rappel dans une tâche d'empan complexe. Cependant, la charge cognitive (i.e. nommer 2 ou 4 couleurs dans le même laps de temps) de la tâche secondaire concurrente au maintien, n'a pas d'impact sur les enfants avant 7 ans. Les enfants de 5 ans ne pourraient pas ou n'essaieraient pas d'alterner leur attention entre

maintien et traitement durant la phase de traitement. Ils réorienteraient leur attention sur le matériel à maintenir uniquement lorsque le traitement serait terminé, conformément aux hypothèses de Towse et Hitch (1998). Ainsi, seule la durée de la tâche devrait impacter les performances de rappel : l'empan mémoriel ne devrait donc pas varier avec la charge cognitive de la tâche secondaire et les performances devraient être équivalentes que la charge cognitive soit modérée (i.e., marche jusqu'à l'étal de la marchande) ou élevée (i.e., marche incluant des obstacles).

Toutefois, l'hypothèse peut être différemment formulée si l'on tient compte du fait que la tâche secondaire est motrice et non purement cognitive. En effet, Barrouillet et al. (2007) dans une tâche d'empan complexe de mémorisation de lettres n'avaient pas mis en évidence d'effet d'une tâche secondaire motrice (i.e. appuyer sur une touche pour indiquer la disposition de carrés) sur la mémoire verbale, car la tâche motrice ne demandait pas suffisamment de contrôle attentionnel pour interférer avec le maintien. Par contre, Portrat et al. (2010) ont montré que, même chez les adultes, le simple fait d'avoir à déplacer la main d'une vingtaine de centimètres pour appuyer sur la touche à l'identique du paradigme précédent entraîne une baisse significative des performances de rappel. Si l'on considère comme vrai le postulat des modèles généraux de MDT selon lequel maintien et traitement partage un même pool de ressources et si l'on prend en compte le fait que le contrôle attentionnel se développe lentement durant l'enfance, alors on peut émettre l'hypothèse qu'en augmentant la charge attentionnelle de la tâche motrice interférente, on en augmente aussi le coût cognitif. On réduit par là même la place dévolue au stockage de l'information mais aussi la quantité d'attention pouvant être allouée au maintien. Quand le coût de la tâche concurrente augmente, alors l'empan mémoriel s'affaiblit. Ainsi, les performances de rappel diminueraient avec l'augmentation de la charge attentionnelle de la tâche secondaire, concurrente au maintien. Dans l'expérience 1, la variation de la charge attentionnelle de la tâche secondaire, motrice, a été conduite dans une optique exploratoire. Du fait du coût cognitif que peut représenter la marche chez le jeune enfant, notamment quand elle est ponctuée d'obstacles, l'hypothèse de la diminution des performances de rappel avec l'augmentation de la charge cognitive de la tâche interférente (i.e. marche avec obstacles vs marche jusqu'à l'étal de la marchande) sera toutefois privilégiée.

Expérience 1

L'étude présentée ci-après avait donc pour objectif l'élaboration d'un paradigme d'évaluation de la mémoire de travail chez les jeunes enfants. Ce paradigme se voulait simple, rapide de passation, et portant sur une tâche concrète pour les jeunes enfants. Le paradigme se devait d'être réalisable par les enfants ciblés, des enfants de 5 ans. Il devait de surcroît être sensible, c'est-à-dire refléter les variations imposées par les facteurs manipulés, i.e. l'introduction d'un délai entre la présentation du modèle et la réalisation par l'enfant et l'introduction d'une tâche concurrente au maintien, tâche dont on a fait varier la charge attentionnelle.

C'est ainsi qu'il a été demandé à trente-sept enfants scolarisés en classe de moyenne section de maternelle de reproduire un modèle présenté à la fois visuellement et oralement. Il s'agissait de faire les courses comme maman. L'expérimentateur montrait dans quel ordre il fallait introduire de 1 à 4 fruits en plastique dans un petit sac transparent. Puis l'enfant devait reproduire la séquence de fruits en tenant compte de l'ordre d'introduction des fruits dans le sac. L'étroitesse du sac permettait d'ailleurs d'empiler verticalement les fruits afin que l'ordre reste bien visible.

Afin d'explorer les capacités mémorielles des enfants de 5 ans, le délai entre la présentation du modèle et la réalisation de la tâche a été manipulé. Le rappel était soit immédiat soit différé de 5 secondes. De plus, le rappel différé pouvait être vide (i.e., temps d'attente avant de répondre) ou dévolu à la mise en œuvre d'une tâche concurrente au maintien. Cette tâche interférente était donc de coût cognitif modéré (i.e., marcher jusqu'à la marchande) ou élevé (i.e., marcher sur des plots censés représenter des pierres pour aller jusqu'à la marchande). Les sujets ont passé toutes les conditions expérimentales (i.e., Immédiat, Différé, Marchande, Pierres), avec 4 essais pour chaque quantité de fruits (de 1 à 4). Pour que la passation ne soit pas trop longue pour ces jeunes enfants, elle s'est déroulée en deux sessions expérimentales comptant chacune deux conditions expérimentales. De plus, une règle d'arrêt (*stop rule*) a été instituée pour que la passation d'une condition de rappel donnée s'arrête lorsque l'enfant échouait à tous les items d'une même longueur de fruits.

Deux variables dépendantes ont été analysées. Tout d'abord, l'empan mémoriel

moyen qui, en attribuant des points à chaque item réussi permettait de calculer l'empan moyen de chaque sujet. L'empan mémoriel calculé donnait ainsi un aperçu du nombre d'items qu'un sujet pouvait rappeler, en moyenne, en fonction des conditions expérimentales. Ensuite, le pourcentage de fruits rappelés dans une position conforme au modèle a aussi été calculé (noté plus loin : pourcentage de fruits DPCM). En effet, certains essais pouvaient ne pas être parfaits et donc n'attribuer aucun point alors même que plusieurs fruits étaient placés conformément au modèle présenté. Ainsi, la réalisation de banane-orange-raisin-tomate pour l'item banane-orange-tomate-raisin obtenait un score de 50% pour la position correcte de banane et orange.

La première question était de savoir si la tâche était réalisable par des jeunes enfants. Si tel était le cas, la deuxième question était de savoir si cette tâche était suffisamment sensible. Dans ce cas, on s'attend tout d'abord à ce que les performances diminuent avec l'augmentation du nombre de fruits à replacer dans le sac. Ensuite, on s'attend à ce que l'empan et le pourcentage de fruits rappelés DPCM soient plus élevés lorsque le rappel est immédiat que lorsqu'il est différé. En outre, on s'attend à ce que l'introduction d'une tâche concurrente au maintien impacte négativement la rétention des informations, c'est-à-dire que les performances soient plus élevées dans la condition de rappel différé vide plutôt que dans le cas de rappel différé couplé à l'introduction d'une tâche motrice. Enfin, le contrôle attentionnel étant le point faible des performances cognitives des jeunes enfants d'une part et l'activité motrice de marche étant encore potentiellement cognitivement coûteuse chez ces jeunes enfants d'autre part, on s'attend à ce que les performances de rappel soient supérieures quand le contrôle attentionnel nécessaire pour réaliser la tâche secondaire est modéré (i.e., marche jusqu'à l'étal de la marchande) plutôt que lorsqu'il est élevé (i.e. marche avec obstacles).

METHODE

Participants

Trente-sept enfants scolarisés en classe de moyenne section de maternelle ont participé à cette étude. Vingt-six enfants étaient issus d'une école, et les 11 autres étaient

issus d'une seconde école, toutes deux rurales. L'âge moyen était de 4 ans et 8 mois (soit 56 mois, écart-type de 3 mois), le plus jeune ayant 4 ans et 3 mois et le plus âgé 5 ans et 2 mois. L'échantillon comptait 18 filles et 19 garçons, 33 droitiers et 3 gauchers, et un enfant dont le maître ne pouvait déterminer avec certitude la latéralité. A la connaissance des enseignants, il n'y avait pas d'enfant daltonien. Tous étaient de langue maternelle française.

Matériel et Procédure

La tâche consistait à « faire les courses comme maman ». La passation était individuelle, dans une pièce calme de l'école. L'expérimentateur et l'enfant disposaient chacun d'un sac transparent et de fruits en plastique. Quatre fruits ont été utilisés : la tomate, la banane, l'orange et le raisin. Ces fruits ont été choisis eu égard à plusieurs critères : (1) ce sont tous des mots bi syllabiques à l'oral (même impact sur la boucle phonologique) ; (2) à chaque fruit correspond une couleur (ce qui évite toute confusion et permet éventuellement un double encodage, Figure 6.1) ; (3) la fréquence de ces mots est assez proche et ils sont censés être acquis entre 2 ans 4 mois et 4 ans 2 mois (effet limité de l'âge d'acquisition ou de la fréquence sur le traitement de ces 4 mots, Tableau 6.1). Ces deux derniers critères ont été pris en compte du fait des effets bien connus en psycholinguistique de fréquence (Balota & Chumbley, 1984 ; Forster & Chambers, 1973 ; Monsell, 1991 ; Rayner, 1977 ; Oldfield & Wingfield, 1964, 1965) et d'âge d'acquisition des mots (voir Johnston & Barry, 2006 ; Juhasz, 2005 pour des synthèses) sur la rapidité d'accès au lexique et le traitement des mots.

Tableau 6.1 : fréquence des mots (selon Manulex, Lété, Sprenger-Charolles, & Colé, 2004 ; et Lexique) et âge d'acquisition objectif en mois, selon Chalard et al (2003).

	Fréquence <u>Manulex</u>	Fréquence <u>Lexique</u>	<u>AoA</u>
Banane	96.26	6.09	28.41
Orange	73.10	11.56	50.83
Raisin	47.20	5.88	43.32
Tomate	47.33	7.88	47.96

Enfin, afin d'optimiser les chances que chaque enfant connaisse bien le nom de chacun des fruits, les enseignants des enfants concernés ont réalisé chacun dans leur classe, durant les deux jours précédant la première session d'expérimentation, un petit travail sur les courses, et plus précisément sur les 4 fruits proposés. Le sachet, quant à lui, a été choisi étroit pour que les fruits puissent s'y empiler et que l'on puisse voir dans quel ordre ils avaient été introduits dans le sac (Figure 6.1).



Figure 6.1. Photographies du matériel utilisé, fruits en plastique et sac transparent.

L'enfant était invité à se placer devant une table, face à l'expérimentateur. La boîte contenant les fruits était sur la table ainsi que deux petits sacs transparents identiques. «Aujourd'hui, (prénom de l'enfant), nous allons jouer à faire les courses comme maman. Tu vois, j'ai un petit sac transparent comme le tien. Je vais mettre des fruits dedans et tu devras faire exactement comme moi avec ton petit sac et tes fruits. Mais dis-moi, tu connais ces fruits ? ». L'enfant était ainsi invité à donner le nom de chacun des fruits. Cette demande avait deux objectifs. Tout d'abord, elle permettait d'établir la relation avec l'enfant, préalable nécessaire pour le bon déroulement de l'expérimentation. Ainsi, en lui demandant de nommer les fruits et en commençant par le plus connu a priori (i.e., la banane), l'enfant était mis à l'aise. Le deuxième objectif était de s'assurer que l'enfant reconnaissait bien les fruits utilisés et connaissait leur nom. En cas d'erreur ou d'échec à donner le nom exact, celui-ci était rappelé à l'enfant, lequel devait le répéter.

La tâche était ensuite expliquée à l'aide d'un exemple qui avait pour but de bien faire comprendre à l'enfant l'importance de respecter l'ordre de l'introduction des fruits dans le sachet. En effet, lorsque l'on fait les courses habituellement, l'ordre n'a pas d'importance sur

le contenu du panier. La consigne était la suivante. « Pour bien t'expliquer, je vais te montrer avec des petits cubes déjà ». La boîte de fruits était alors ôtée de la table et 6 cubes de couleur (2 jaunes, 2 rouges et 2 verts) venaient les remplacer. « Regarde. Je vais te dire par exemple, je mets le rouge en premier dans le sac (le geste accompagnant la parole) et ensuite je mets le jaune. Et toi, tu devras mettre le rouge en premier (geste accompagnant la parole avec le sac de l'enfant) et ensuite le jaune. » Les deux sacs étaient alors placés côte à côte. « Tu vois, c'est pareil. On vide les sacs et maintenant, c'est toi qui vas faire ». Deux autres exemples étaient ainsi faits avec l'enfant. Le premier exemple se faisait avec le modèle sous les yeux et en montrant ensuite les deux sacs côte à côte (« oui, c'est ça, tu as compris, c'est pareil » ou « non, ce n'est pas ça regarde, ce n'est pas pareil. Tu aurais dû... »). Le second exemple se faisait avec le modèle caché. Un troisième exemple pouvait être administré en cas d'échec. «Voilà, maintenant que tu as bien compris, on va faire la même chose avec les fruits ». Afin de se mettre dans des conditions motivantes pour ces jeunes enfants, il était ajouté « si je vois que tu as bien fait les courses, à la fin, je te donnerai une pièce » (en chocolat).

La session expérimentale commençait alors. Il faut noter que durant la présentation du modèle, l'expérimentateur nommait les fruits en les introduisant dans le sac. Respectant les paradigmes de mesure d'empan classiques (e.g., Barrouillet et al., 2009; Smith & Scholey, 1992), des essais de longueur croissante avec 1, 2, 3 et 4 fruits introduits dans le sac, ont été présentés. Pour que la tâche ne soit pas trop longue pour ces jeunes enfants, 4 essais par quantité ont été administrés. Une règle d'arrêt (*stop rule*) des essais a été introduite afin de ne pas prolonger la passation lorsque la tâche devenait trop difficile. Ainsi, les essais de longueur supérieure à $n+1$ fruits n'étaient pas proposés lorsque tous les essais à n fruits étaient échoués. Pour déterminer les séquences de fruits à présenter à chaque enfant et pour chaque essai, un tirage au sort sans remise entre tous les ordres possibles a été effectué pour chaque sujet, pour chaque quantité et chaque condition expérimentale.

Chaque sujet accomplissait les 4 conditions expérimentales, soit une condition de rappel immédiat et 3 conditions de rappel différé de 5 secondes. Dans la Condition rappel immédiat, le sujet pouvait reproduire immédiatement la combinaison de fruits proposée.

Dans la Condition de rappel différé simple, le sujet devait attendre un délai de 5 secondes avant de pouvoir reproduire le modèle. Afin que la situation d'attente ne soit pas trop artificielle, il était expliqué aux enfants qu'ils devaient attendre l'ouverture du magasin. La présentation de l'image ci-contre signifiait aux enfants que le magasin ouvrait ses portes et qu'ils pouvaient alors prendre les fruits.



u11397478 www.fotosearch.fr

Dans la Condition différée Marchande, le sujet devait se rendre à l'étal de la marchande située à 6 mètres de l'endroit où le modèle était proposé pour prendre les fruits et reproduire la combinaison.



Dans la Condition différée Pierres, le sujet devait se rendre à la marchande située à 5 mètres de l'endroit où le modèle était présenté en passant par un chemin de deux « pierres ».



Le délai était donc manipulé entre la condition Immédiat et les trois autres conditions. Il est à noter que l'idée était de conserver le même délai entre les trois conditions de rappel différé, soit 5 secondes. Pour évaluer la distance d'écartement entre l'endroit où était montré le modèle d'une part et la marchande d'autre part (conditions Marchande et Pierres), un prétest avait été réalisé avec 6 enfants de moyenne section (3 garçons et 3 filles). Il leur avait été demandé de marcher sur une ligne droite jusqu'au «stop» de l'expérimentateur (i.e., au bout de 5 s) puis de poser l'objet qu'il portait à leurs pieds. Une distance moyenne de 6 mètres a été ainsi évaluée lorsque les enfants marchaient simplement, et 5 mètres lorsqu'ils rencontraient sur leur passage deux pierres. Ce qui diffère donc entre ces 3 conditions est la présence ou l'absence de tâche secondaire motrice s'opérant entre les conditions de rappel différé simple (i.e., attente) d'une part et de marche avec ou sans obstacles d'autre part. De plus, la tâche secondaire, motrice, impliquait un contrôle attentionnel modéré pour la condition Marchande (i.e., marche), ou élevé pour la condition Pierres (i.e., marche avec obstacles).

Des consignes supplémentaires étaient apportées pour les 3 conditions différées. Pour la Condition rappel différé simple : « Il y a une petite chose qui va changer, c'est que tu vas devoir attendre que le magasin ouvre pour pouvoir faire comme moi. En fait, tu vas devoir attendre que je te montre cette image qui dit que le magasin est ouvert pour pouvoir prendre les fruits » (si l'enfant hésitait pour les premiers items quand je montrais l'image, j'ajoutais « vas-y »). Pour la Condition Marchande : « Il y a une petite chose qui va changer. Tu vois la marchande là-bas ? Après que je t'aurai montré le modèle, tu devras aller à la marchande en marchant pour prendre les fruits dont tu as besoin ». Pour la Condition Pierres : « Il y a une petite chose qui va changer. Tu vois la marchande ? Après que je t'aurai montré le modèle, tu devras aller à la marchande en passant par les deux petites pierres qui sont là (je faisais le trajet pour montrer). Là-bas, tu pourras prendre les fruits dont tu as besoin ».

Les sujets réalisant les quatre conditions expérimentales, celles-ci ont été présentées en deux sessions expérimentales comptant chacune 2 conditions expérimentales administrées à 1 semaine d'intervalle. Cette précaution a été prise pour éviter que la passation ne soit trop longue pour ces jeunes enfants dont les capacités attentionnelles sont

limitées. Chaque session expérimentale durerait ainsi entre 10 et 25 minutes par enfant en fonction du nombre d'items passés mais surtout de la tonicité de l'enfant concerné.

De plus, pour éviter tout effet d'ordre et d'apprentissage, les conditions n'ont pas toujours été présentées dans le même ordre (Tableau 6.2). Il n'a pas été retenu de réaliser tous les ordres possibles (16) du fait du nombre restreint d'enfants car il n'y aurait eu qu'un nombre faible d'enfants par ordre. La répartition a donc été opérée à partir d'un carré latin pour finalement avoir 8 groupes. Les sujets 33 à 37 ont été affectés aux groupes par tirage au sort sans remise. Un protocole de passation, tel que celui reproduit en annexe 1, permettait de recueillir les résultats pour chaque enfant.

Tableau 6.2 : Répartition des sujets au sein des groupes en fonction de l'ordre de passation des conditions expérimentales.

	Première session	Deuxième session
Groupe 1 (sujets 1 à 4)	Immédiat-Différé Simple	Marchande-Pierres
Groupe 2 (sujets 5 à 8 ; 37)	Immédiat-Différé Simple	Pierres-Marchande
Groupe 3 (sujets 9 à 12)	Différé Simple-Immédiat	Marchande-Pierres
Groupe 4 (sujets 13 à 16 ; 34)	Différé Simple-Immédiat	Pierres-Marchande
Groupe 5 (sujets 17 à 20 ; 33)	Marchande-Pierres	Différé Simple-Immédiat
Groupe 6 (sujets 21 à 24 ; 35)	Marchande-Pierres	Immédiat-Différé Simple
Groupe 7 (sujets 25 à 28 ; 36)	Pierres-Marchande	Différé Simple-Immédiat
Groupe 8 (sujets 29 à 32)	Pierres-Marchande	Immédiat-Différé Simple

RESULTATS

Tout d'abord, une analyse a été conduite sur les effets des conditions de rappel (i.e., 4 : Immédiat, Différé, Marchande, Pierres) sur l'empan moyen en mémoire des 37 sujets de l'étude. L'empan moyen a été calculé de la manière suivante : chaque item reproduit exactement avec les bons fruits et dans l'ordre exact rapportait un quart de point. Par exemple, 4 essais réussis avec 1 fruit (1 point), 3 essais réussis avec 2 fruits (0.75 point), 2 essais réussis avec 3 fruits (0.5 point) et aucun avec 4 fruits (0 point) situaient l'empan moyen à 2.25 fruits.

Ensuite, l'analyse a été poursuivie en s'intéressant aux effets des conditions de rappel (i.e., 4 : Immédiat, Différé, Marchande, Pierres) sur le pourcentage de fruits rappelés dans une position conforme au modèle (pourcentage de fruits rappelés DPCM). Cette analyse

nous est apparue indispensable pour prendre en compte un maximum de données et tenir compte de toutes les réussites des enfants et pas uniquement des performances parfaites. En effet, un essai pouvait ne pas attribuer de point d'empan alors que, par exemple, 2 fruits étaient correctement placés sur un essai à 3 fruits. Ainsi chaque fruit placé à la même place que dans le modèle rapportait 1 point. Par exemple, si l'ordre était Banane-Orange-Tomate et que l'enfant plaçait Raisin-Orange-Tomate, il se voyait attribuer 2 points pour les bonnes places attribuées à Orange et Tomate. Raisin-Banane-Tomate ne rapportait quant à lui qu'un seul point. Les résultats ont ensuite été traduits en pourcentages. Après avoir analysé les performances d'un point de vue global, les performances des sujets ayant eu les scores les plus faibles vs les plus forts ont été examinés plus précisément afin d'affiner l'analyse.

Enfin, lors du dépouillement des résultats, il est apparu que les fruits étaient mieux rappelés lorsqu'ils étaient placés au fond du sac ou au-dessus du sac, c'est à dire respectivement en première ou en dernière position. La troisième partie présente donc l'analyse des données étendues, a posteriori, à l'observation de l'effet de position sérielle dans les essais à 4 fruits pour les 15 sujets ayant passé tous les essais du protocole, c'est-à-dire n'ayant pas été stoppés par la règle d'arrêt (i.e., la passation s'arrête quand tous les essais d'une même quantité de fruits sont échoués).

Empan en mémoire

Du fait de l'absence d'effet d'ordre de passation sur l'empan moyen, et l'absence d'interaction entre ordre de passation et condition de rappel, le facteur d'ordre n'a pas été introduit dans l'analyse suivante, $F < 1$ et $F(21,87) = 1.31$, $p = .19$ respectivement. Cependant, l'absence d'effet significatif ne donnant pas d'argument en faveur de l'hypothèse nulle, nous avons calculé le critère d'information bayésien (*Bayesian Information Criteria, BIC*) pour l'ensemble de ces effets (Masson, 2011; Wagenmakers, 2007). Les probabilités obtenues alors étaient $p_{BIC}(H_0|D) > .99$. Une probabilité supérieure à .75 représente une preuve que l'hypothèse nulle est vraie, alors qu'une probabilité comprise entre .75 et .98 représente une preuve forte, et une probabilité supérieure à .99 une preuve très forte que l'hypothèse nulle est vraie (Masson, 2011). Ainsi, cette analyse statistique apporte une preuve supplémentaire

de l'absence d'effet de l'ordre de passation sur l'empan moyen.

La tâche proposée était réalisable par les jeunes enfants. En effet, les données brutes attestent que tous les enfants ont réussi au moins un item à 2 fruits et que 15 enfants (soit 41% des sujets) ont passé la totalité des items du protocole sans être arrêtés par la règle d'arrêt. Vingt-sept enfants (soit 73% des sujets) ont réussi au moins un essai à 4 fruits dans l'une des conditions. Enfin, aucun élève n'a dû être écarté de l'expérimentation pour défaut de compréhension de la consigne. Notre premier objectif, proposer une tâche réalisable par les jeunes enfants, a donc été atteint (Figure 6.2).

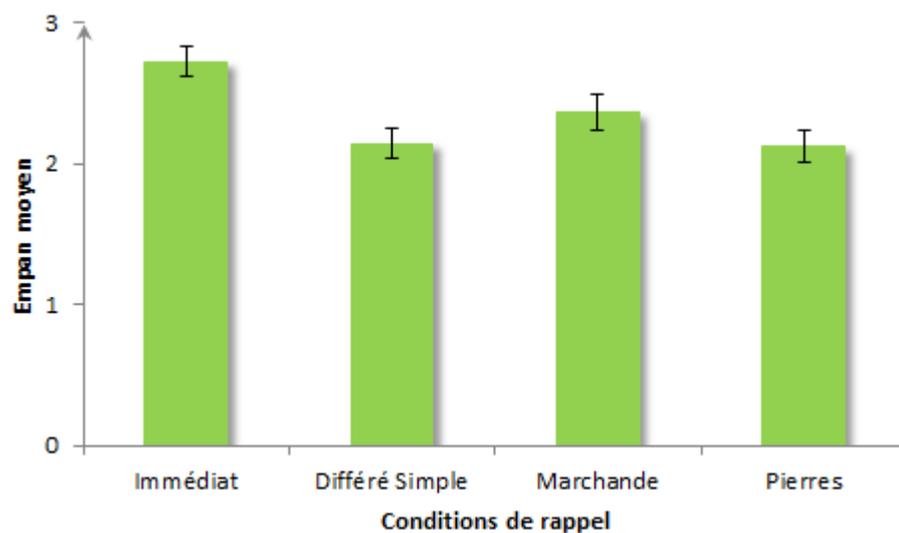


Figure 6.2 : Empan moyen observé en fonction de la condition expérimentale de rappel (Immédiat, Différé Simple, Marchande, Pierres). Les barres correspondent aux erreurs standard.

Une analyse de variance (ANOVA) a donc été réalisée sur la variable dépendante d'empan, avec les conditions de rappel (4 : rappel Immédiat, Différé, Marchande, Pierres) comme facteur intra-sujet. L'empan moyen variait en fonction des conditions de rappel, $F(3,108) = 19.96$, $p < .0001$, $\eta^2 = .36$. Conformément à notre hypothèse, l'empan en rappel immédiat était plus élevé (i.e., 2.73) que les empan en rappel différé (i.e., 2.21). L'analyse a priori du contraste entre rappel immédiat d'une part et rappels différés d'autre part confirmait ce résultat, $p < .0001$.

Cependant, contrairement à ce que nous attendions, i.e., une diminution des

performances avec l'introduction d'une tâche secondaire, un tout autre pattern a émergé. En effet, les performances de rappel en différé simple (2.15) n'étaient pas supérieures aux performances de rappel quand une tâche secondaire était introduite (2.24), $F(1,36)=1.53$, $p=0.22$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.74$. Toutefois, les contrastes a posteriori, comparant les performances de rappel en différé simple à chacun des rappels introduisant une tâche secondaire, ont permis de mettre en lumière un pattern différent en fonction du coût attentionnel de la tâche secondaire. En effet, les performances en rappel différé simple (2.15) ne différaient pas de celles en rappel introduisant une tâche secondaire demandant un contrôle attentionnel élevé (i.e., condition Pierres, 2.12), $p=.76$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.85$. A l'opposé, les performances de rappel étaient supérieures dans le cas où la tâche secondaire introduite impliquait un contrôle attentionnel modéré (i.e., marche, 2.37) par rapport à un différé simple, $p<.02$.

Enfin, conformément à nos hypothèses, l'augmentation de la charge attentionnelle de la tâche concurrente entraînait la diminution des performances de rappel. Ainsi, les performances de rappel étaient inférieures quand le contrôle attentionnel nécessaire à la réalisation de la tâche secondaire était élevé (i.e., Pierres, 2.12) plutôt que lorsqu'il était modéré (i.e., Marchande, 2.36), $F(1,36)=6.15$, $p<.02$.

Nos hypothèses concernant l'effet des conditions expérimentales sur la variable d'empan ont donc été partiellement confirmées : les performances de rappel étaient supérieures en rappel immédiat qu'en différé ; l'introduction d'une tâche secondaire n'entraînait pas la diminution des performances de rappel ; l'augmentation de la charge attentionnelle de la tâche secondaire entraînait une diminution des performances de rappel. En résumé, le pattern de réussite en fonction des conditions expérimentales de rappel était le suivant : les performances en différé simple et en différé avec introduction d'une tâche secondaire demandant un contrôle attentionnel élevé (i.e. Pierres) étaient à la fois similaires entre elles et toutes deux inférieures aux performances de la condition différée avec introduction d'une tâche secondaire impliquant un contrôle attentionnel modéré (i.e., Marchande).

Pourcentage de fruits remplacés dans une position conforme au modèle

Afin de prendre en compte un maximum de données concernant les réussites des enfants et ce, indépendamment de leur empan, le pourcentage de fruits remplacés conformément au modèle (noté après pourcentage DPCM) a été calculé. En effet, alors que, par exemple, l'essai Banane-Orange-Tomate réalisé pour le modèle Banane-Orange-Raisin n'attribue pas de point d'empan car l'essai est imparfait, il n'en demeure pas moins que 2 fruits sur 3 étaient bien placés. Ainsi, le nombre de fruits remplacés conformément au modèle a été calculé pour chaque enfant, chaque quantité de fruits et chaque condition expérimentale. Celui-ci a ensuite été transformé en pourcentages, les sujets ayant passé 4 essais par longueur de fruits et par condition expérimentale. L'effet de l'ordre de passation n'étant pas significatif, pas plus que son interaction avec la condition expérimentale de rappel, il n'a pas été introduit dans les analyses rapportées ici, $F(7,29)=1.03$, $p=.43$ et $F(21,87)=1.15$, $p=.32$ respectivement, $ps_{BIC}(H_0|D) >.99$.

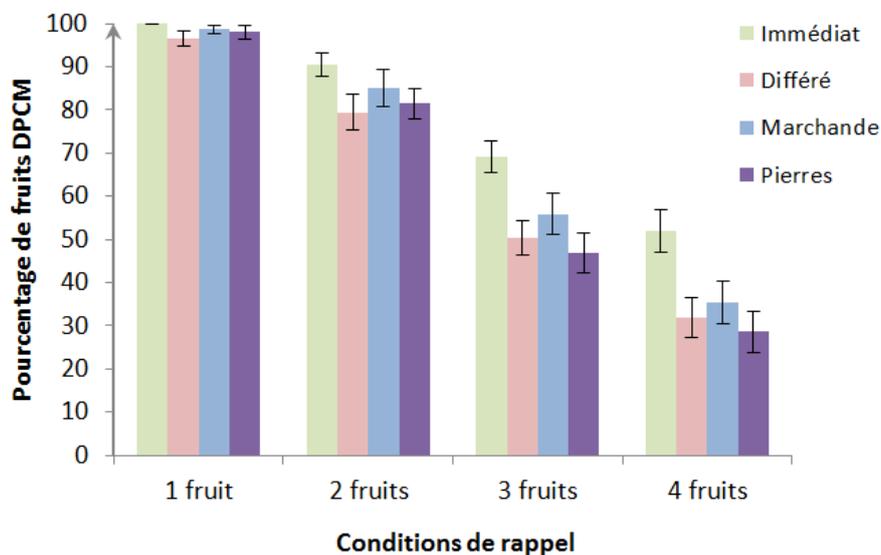


Figure 6.3 : Pourcentage de fruits rappelés dans une position conforme au modèle en fonction de la condition expérimentale de rappel (Immédiat, Différé Simple, Marchande, Pierres). Les barres correspondent aux erreurs standard.

Une ANOVA a porté sur les pourcentages de fruits remplacés dans une position conforme au modèle avec la condition expérimentale de rappel (4 : immédiat, différé simple, marchande ou pierres) et le nombre de fruits (1 à 4) comme facteurs intra-sujets. Elle révèle sans surprise que les performances de rappel diminuaient avec le nombre de fruits à

rappeler, les performances pour chaque quantité n de fruits étant supérieures à celles de la quantité $n+1$ $F(3,108)=202.31$, $p<.0001$, $\eta^2=.85$, $ps<.0001$ (Figure 6.3). La condition expérimentale avait aussi un impact sur les performances de rappel, $F(3,108)=14.51$, $p<.0001$, $\eta^2=.29$. Plus précisément et conformément à nos prédictions, les analyses menées a priori indiquent que les performances en rappel immédiat (81%) sont supérieures à celles des rappels différés (73%), $F(1,36)=37.67$, $p<.0001$. Comme pour la variable d'empan, on observait 3 faits principaux. Premièrement, l'introduction d'une tâche concurrente (73%) n'entraînait pas de diminution des performances de rappel par rapport au différé simple (73%), $F<1$. Deuxièmement, une charge attentionnelle plus élevée de la tâche secondaire entraînait une diminution des performances (71%) par rapport à une charge plus modérée (75%), $F(1,36)=5.02$, $p<.04$. Troisièmement, les performances en différé simple semblaient assez similaires de celles obtenues dans la condition avec tâche requérant un contrôle attentionnel élevé (i.e. Pierres), résultat confirmé par une analyse a posteriori, $p=.38$.

Notons que l'effet de la condition expérimentale était différent selon le nombre de fruits, $F(9,261)=3.13$, $p<.002$, $\eta^2=.10$. Toutefois, cette interaction était significative du fait que l'effet de la condition ne s'exprimait qu'à partir de la quantité 2 fruits, les performances dans les essais à 1 fruit atteignant un effet plafond (i.e., 98%), $ps <.03$ et $F(3,108)=1.55$, $p=.21$, $p_{BIC}(H0|D)>.99$. Un fruit à retenir est donc en-deçà des capacités mémorielles des enfants de 5 ans et ce, dans toutes les conditions de rappel.

Ainsi ces résultats confirment ceux obtenus précédemment : les performances de rappel sont plus élevées lorsque le rappel est immédiat plutôt que différé ; l'introduction d'une tâche secondaire n'entraîne pas de dégradation des performances de rappel ; et la charge attentionnelle de la tâche secondaire influe négativement sur les performances de rappel. Là encore, les performances en différé simple sont à la fois similaires à celles obtenues en différé couplé avec une tâche demandant un contrôle attentionnel élevé (i.e. Pierres), et inférieures à celles obtenues quand une tâche demandant un contrôle attentionnel modéré (i.e. Marchande) est mise en œuvre.

Afin d'aller plus loin dans l'analyse de ces données et d'évaluer la sensibilité du

paradigme à différencier les sujets selon leurs compétences mémorielles, l'analyse a été menée plus avant en considérant deux groupes de sujets déterminés à partir de la performance moyenne des sujets au travers des 4 conditions expérimentales. Ainsi, le groupe a été divisé en trois groupes de sujets, les 13 sujets ayant les performances les plus élevées, les 12 sujets intermédiaires et les 13 sujets ayant les performances les plus faibles. Les groupes extrêmes ont ensuite été comparés pour observer si les patterns de réponse étaient identiques.

Analyse du pourcentage de fruits DPCM dans les groupes extrêmes.

Une ANOVA similaire à la précédente a été conduite pour chaque groupe observé. L'effet simple de la condition expérimentale s'est révélé significatif pour les forts comme pour les faibles, $F(3,36)=8.85$, $p<.001$, $\eta^2=.42$ et $F(3,36)=2.81$, $p<.05$, $\eta^2=.19$ respectivement.

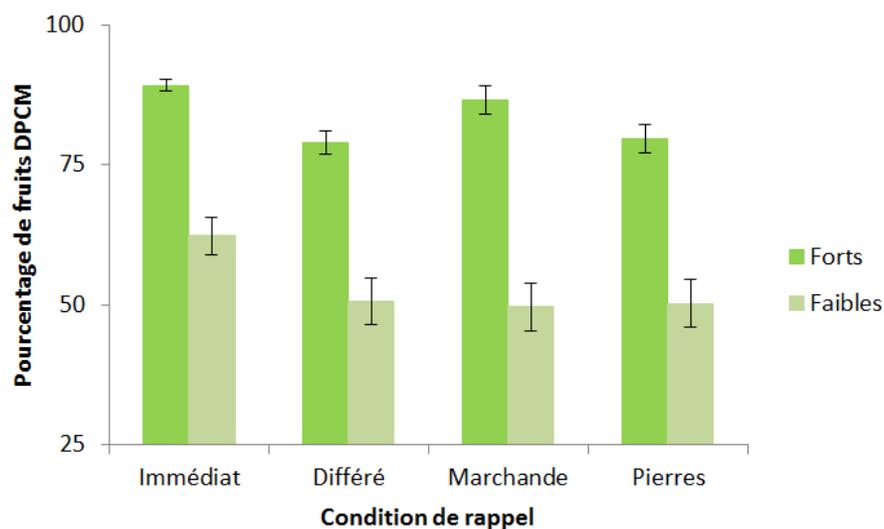


Figure 6.4 : Pourcentage de fruits rappelés dans une position conforme au modèle en fonction de la condition expérimentale de rappel (Immédiat, Différé Simple, Marchande, Pierres) et du groupe d'appartenance des sujets (forts vs faibles). Les barres correspondent à l'erreur standard.

Dans chacun des groupes, les performances diminuaient avec l'introduction d'un délai (89% contre 82% pour les forts, 62% contre 50% pour les faibles), $F(1,12)=22.84$, $p<.001$ et $F(1,12)=9.92$, $p<.01$ respectivement. En outre, là encore l'introduction d'une tâche secondaire n'avait pas d'impact sur les performances de rappel (83% pour les forts, 50% pour les faibles) par rapport à un différé vide (79% pour les forts, 50% pour les faibles) même

si la différence tendait à être significative pour le groupe des forts, $F(1,12)=3.75$, $p=.07$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.38$ et $F<1$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.78$ respectivement. Par contre, comme l'illustre la figure 6.4, la variation du contrôle attentionnel impliqué dans la tâche secondaire n'avait pas le même impact dans les deux groupes de sujets.

Ainsi, l'augmentation du contrôle attentionnel à exercer au sein de la tâche secondaire n'influit pas davantage sur les performances de rappel des enfants les plus faibles (50% dans chacune des conditions), $F<1$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D) >.78$. A l'opposé, les performances des enfants les plus forts diminuaient alors que le contrôle attentionnel nécessaire à la réalisation de la tâche secondaire augmentait (de 87 à 80%), $F(1,12)=6.27$, $p<.03$. De plus pour les plus forts, les performances dans la condition où la tâche secondaire impliquait un contrôle attentionnel modéré (i.e. Marchande, 87%) étaient à la fois supérieures aux autres rappels différés (i.e. différés Vide, 79% et Pierres, 80%) et similaires à la condition de rappel immédiat (89%), $ps<.007$ et $p=.77$ respectivement. Finalement, les performances des plus faibles étaient surtout impactées par l'introduction d'un délai, les rappels différés étant tous inférieurs au rappel immédiat, $ps<.03$. Les plus forts, quant à eux, montraient une amélioration inattendue de leurs performances de rappel quand une tâche secondaire demandant un contrôle attentionnel modéré était introduite durant le délai de rétention.

Position sérielle

Les fruits en première et dernière position semblent mieux restitués que les fruits intermédiaires, effets bien connus de la littérature, une ANOVA a été conduite sur le pourcentage de fruits rappelés DPCM dans les essais à 4 fruits avec la position du fruit (1^{ère} à 4^{ème}) et la condition de rappel (4 : Immédiat, Différé, Marchande, Pierres) comme facteurs intra sujet. Rappelons que seuls 15 sujets n'ont pas été stoppés par la règle d'arrêt et ont donc passé l'ensemble du protocole. L'analyse rapportée ici concerne donc les protocoles de ces 15 sujets. L'effet de l'ordre de passation sur le pourcentage de fruit DPCM n'étant pas significatif, de même que les effets d'interaction entre l'ordre de passation et les autres facteurs, il n'a pas été introduit dans l'analyse statistique rapportée ici, $F_s<1$,

$p_{\text{BIC}}(H_0|D) > .99$.

La courbe en U classique des effets de récence et de primauté est visible au travers de toutes les conditions expérimentales et cet effet était significatif, $F(3,42)=13.12$, $p<.0001$, $\eta^2=.48$ (Figure 6.5). Le nombre de fruits placés dans une position conforme au modèle était supérieur lorsque les fruits étaient en première (3.05) et dernière (2.83) positions comparativement aux deuxième (2.27) et troisième (1.95) positions. Des contrastes a priori confirment que les performances de rappel diffèrent significativement en fonction de la position du fruit à rappeler ($ps<.05$) hormis les performances concernant les premiers et derniers fruits qui ne diffèrent pas significativement ($p=.45$).

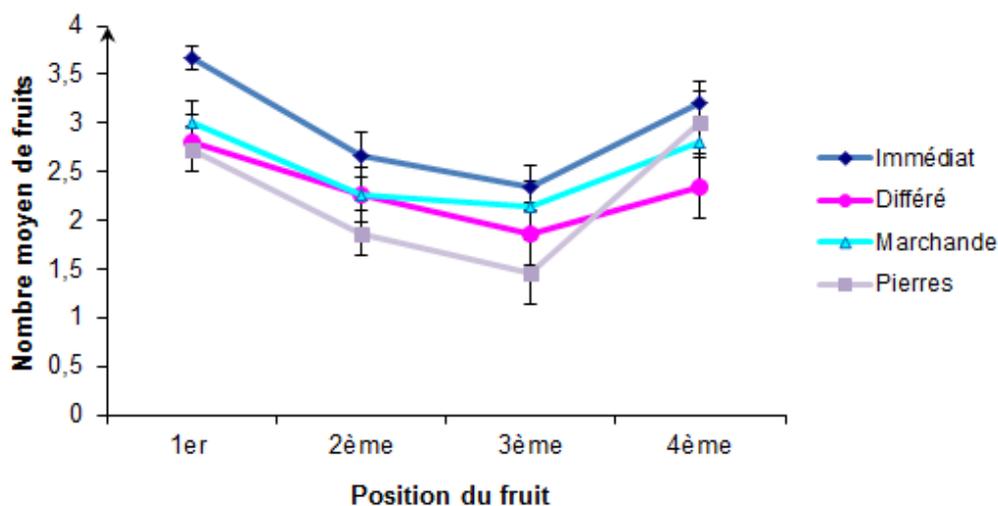


Figure 6.5 : Nombre moyen de fruits rappelés (de 1 à 4) en fonction de la position du fruit (1er à 4ème) et de la condition expérimentale de rappel (Immédiat, Différé, Marchande, Pierres). Les barres représentent l'erreur standard.

L'effet simple de la condition expérimentale était significatif, $F(3,42)=2.74$, $p<.05$, $\eta^2=.17$. La comparaison des conditions expérimentales a posteriori a montré une différence significative entre les conditions Immédiat et Différé simple d'une part et Immédiat et Pierres d'autre part ($ps<.02$), les autres contrastes ne mettant pas en lumière d'autre différence significative, $ps>.12$. D'ailleurs, le contraste orthogonal Immédiat vs Rappels différés expliquait à lui seul 78 % de la variance intergroupe. De plus, l'effet de la position sérielle ne s'exprimait pas de manière différente selon les conditions de rappel, l'interaction n'étant pas significative, $F(9,126) = 1.45$, $p=.30$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D) > .99$. L'effet de la condition expérimentale observé précédemment ne dépendait donc pas de l'effet de position sérielle.

DISCUSSION

Le but de cette étude était l'élaboration d'un paradigme d'évaluation de la mémoire de travail du jeune enfant, lequel paradigme devait par la suite permettre l'exploration des capacités mémorielles des enfants entre 2 et 6 ans. Deux objectifs avaient été fixés. Le premier était que la tâche soit réalisable par les enfants de 5 ans. Le deuxième objectif était que la tâche soit sensible aux variations induites par l'expérimentation à savoir l'introduction d'un délai entre la présentation du modèle et la réalisation par l'enfant, et l'introduction d'une tâche concurrente au maintien durant le délai, tâche dont on faisait varier la charge attentionnelle. Le premier objectif a été atteint, la tâche est réalisable par les enfants de 5 ans. Ce premier résultat aura des conséquences sur la suite du travail de thèse puisque l'on va pouvoir étendre l'expérimentation à des enfants plus jeunes et plus âgés. D'autre part, puisque notre deuxième objectif a été atteint et que la tâche est sensible, même si tous les résultats ne vont pas dans le sens attendu, l'utilisation de ce paradigme est pertinente dans l'étude des jeunes enfants car il va nous permettre de mieux comprendre le fonctionnement de la mémorisation à court terme. Notamment, à partir des résultats obtenus dans cette première exploration, deux nouveaux champs de recherche apparaissent très clairement comme étant fondamentaux à explorer chez le jeune enfant. Le premier sera l'étude du déclin temporel de l'information en mémoire et le deuxième sera l'étude de l'impact de l'activité motrice sur le maintien de l'information à court terme.

Cependant, les résultats n'allaient pas tous dans le sens attendu. En effet, l'effet délétère du temps sur les performances de rappel a bien été confirmé mais l'introduction d'une tâche secondaire n'a pas influencé les performances de rappel comme nous l'attendions. En effet, nous avons émis deux hypothèses. La première était que l'introduction d'une tâche secondaire motrice allait impacter négativement les performances, de même que l'augmentation du contrôle attentionnel lié à l'exécution de la tâche concurrente. Finalement, bien que les performances de rappel aient diminué avec l'augmentation de la charge attentionnelle de la tâche secondaire, les performances de rappel n'étaient pas inférieures dans le cas d'un rappel différé avec tâche secondaire comparativement à un rappel différé vide. Un résultat inattendu a même émergé des comparaisons a posteriori des conditions expérimentales entre elles : la condition avec tâche

secondaire impliquant une marche directe vers la marchande entraînait des performances de rappel supérieures à celle de la condition en différé simple, voire des performances comparables à celles du rappel immédiat, pour les enfants ayant a priori les meilleures capacités mémorielles. Après avoir expliqué en quoi cette expérience remplit ses deux objectifs, l'effet délétère du temps sur les performances de rappel observé ici sera replacé dans le contexte de la littérature sur le sujet. Puis, le résultat inattendu de l'amélioration des performances de rappel dans le cas où l'enfant marchait durant le délai de rétention, i.e. quand la tâche secondaire motrice demandait un contrôle attentionnel modéré, sera discuté au travers de deux hypothèses explicatives.

Le premier objectif de cette expérience a donc été atteint puisque l'analyse des résultats a montré que la tâche était réalisable par les enfants de 5 ans. En effet, la majorité des enfants ont réussi au moins un des items les plus difficiles (4 fruits) dans une des conditions de rappel, et plus d'un tiers des sujets a passé l'ensemble du protocole prévu. La compréhension a été rapide et facile pour la très grande majorité des sujets et aucun sujet prévu n'a été éliminé pour incompréhension de la tâche. Ce paradigme est donc approprié à l'étude des jeunes enfants. La mesure de la capacité mémorielle ne peut se faire que si les items à mémoriser ont été correctement encodés. Or, comme l'ont montré Cowan, Sauls et Morey (2006), les stratégies d'encodage évoluent entre l'enfance et l'âge adulte (sans qu'ils aient cité d'âge critique) depuis les stratégies utilisant les associations verbal/spatial aux stratégies basées sur la répétition verbale. Or, précisément, l'encodage que l'on peut mettre en œuvre pour mener à bien la tâche de notre paradigme peut être de plusieurs natures. En effet, l'encodage peut se faire à partir d'indices spatiaux (e.g. réalisation de l'empilement devant l'enfant, vision de l'objectif final, prise d'indices visuels sur la forme et la couleur des fruits) ou bien d'indices verbaux (e.g. verbalisation de l'enchaînement « d'abord on met la banane... et pour terminer l'orange... », verbalisation du nom des fruits) ou encore à partir de la coordination de ces deux types d'indices. Notre paradigme laisse donc la possibilité aux sujets de l'encodage qui correspond le mieux à leur niveau de développement. Cela est particulièrement intéressant car on peut imaginer alors que le paradigme puisse être étendu à l'étude d'enfants plus jeunes qui pourront, eux aussi, utiliser le type d'encodage correspondant le mieux à leurs possibilités développementales. Ainsi, l'étude des capacités

mémorielles des enfants de 2 ans et demi à 6 ans seront explorées à l'aide de ce paradigme au travers de cinq expériences rapportées dans les septième et huitième chapitres, au sein de la partie expérimentale. Le deuxième objectif de cette expérience a également été atteint puisque les résultats ont montré que notre paradigme était sensible notamment à l'augmentation du nombre de fruits à restituer puisque celle-ci entraînait la diminution drastique des performances de rappel. Le maintien d'un seul item était en deçà des capacités mémorielles de l'ensemble des sujets de l'étude, les performances de rappel des essais à un fruit étant quasi-parfaites dans toutes les conditions de passation.

Conformément à nos attentes, les performances de rappel ont diminué avec l'introduction d'un délai. Cela a été observé avec la variable dépendante d'empan, la variable dépendante du pourcentage de fruits placés dans une position conforme au modèle mais aussi à partir des données étudiées a posteriori sur les performances de rappel en fonction de la position sérielle du fruit. Ainsi, même en l'absence de tâche distractive, c'est-à-dire dans la condition où les enfants ne faisaient qu'attendre pour pouvoir réaliser la tâche, le maintien à court terme de l'information souffrait du passage du temps. Ce premier résultat conforte les résultats d'études antérieures montrant un déclin temporel de l'information. Par ailleurs, il est congruent avec l'étude de Camos et Barrouillet (2011) qui montraient que les enfants avant l'âge de 7 ans ne mettaient pas en œuvre spontanément de stratégie de maintien de l'information. En effet, dans leur expérience, le facteur déterminant les performances de maintien à 6 ans était le temps. Ainsi, les auteurs défendent que le maintien est passif à 6 ans. Notre étude confirme ce résultat. De plus, puisque le maintien de l'information chez le jeune enfant est passif, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de stratégie de maintien à contrecarrer pour quantifier le déclin temporel de l'information, il apparaît tout naturellement qu'étudier la vitesse d'oubli de l'information au cours du temps chez le jeune enfant est particulièrement pertinent et facile à mettre en œuvre. En effet, il n'est pas nécessaire de penser à une situation de double tâche permettant de bloquer les mécanismes de maintien de l'information (i.e., répétition articulatoire ou rafraîchissement attentionnel) pour observer le déclin : il suffit d'observer l'évolution des performances au cours du temps qui passe. Ainsi, le travail de thèse se poursuivra par l'étude spécifique de la vitesse de déclin chez le jeune enfant au travers de

deux expériences menées à l'aide de ce paradigme, une concernant des enfants de 4 à 6 ans et une concernant des enfants de 2 ans à 3 ans et demi. Une autre expérience menée avec un autre paradigme original, la course de ski des poupées, auprès d'enfants de 4 à 6 ans viendra conforter les résultats obtenus. Ce travail sera présenté dans le septième chapitre, au sein de cette partie expérimentale.

En ce qui concernait l'impact de l'introduction d'une tâche secondaire dont on faisait varier la charge attentionnelle, l'augmentation des performances de rappel quand l'enfant marchait durant le délai de rétention par rapport à un délai de rétention vide était un résultat tout à fait inattendu. Deux hypothèses, ne s'excluant pas mutuellement, peuvent expliquer cet état de fait. La première est que la condition en différé simple est particulièrement difficile pour les jeunes enfants et la deuxième est que la condition en différé avec activité motrice impliquant un contrôle attentionnel modéré facilite le maintien à court terme.

Ainsi, la condition sans tâche concurrente (attente) pouvait être beaucoup plus difficile que nous l'avions prédit puisque son niveau de réussite était inférieur à celui de la condition avec tâche concurrente impliquant une marche directe vers la marchande. De surcroît, les performances de rappel n'étaient pas différentes de la condition avec la tâche attentionnelle la plus lourde (i.e., marche avec obstacles) et ce, pour chacune des variables dépendantes. Les faibles performances en rappel différé simple pourraient s'expliquer par le fait que la tâche sans charge attentionnelle telle que nous l'avons conçue serait spécifiquement difficile pour les enfants de 5 ans. Le fait « d'attendre » pour réaliser la tâche pourrait en effet être très invalidant pour des enfants de cet âge car rien dans la tâche ne leur permet de garder leur attention dirigée vers le maintien de l'information à retenir, ni sur le maintien du but de l'activité. Lors de la passation, les enfants ne savaient pas comment occuper le temps de latence entre la présentation et la réalisation. Généralement, ils regardaient la pièce autour d'eux ou jouaient avec leurs vêtements ou encore en profitaient pour tenter de raconter quelque chose à l'expérimentateur. La consigne les encourageait d'ailleurs à une certaine passivité puisque elle contenait deux fois le mot «attendre» : la passivité cognitive s'est couplée avec la passivité physique. Or, on sait que l'activité motrice

peut être une aide dans différentes activités cognitives et augmenter les performances obtenues, par exemple dans la mémorisation à long terme (Conway & Gathercole, 1990). Les sujets n'ont pas réussi à mettre en œuvre une activité cognitive dirigée vers le maintien. D'autre part, pour certains enfants, inhiber la réponse dominante qui était de rentrer dans l'action en prenant les fruits pour les placer dans le sac, était compliqué. Cette réponse dominante était en effet pertinente dans le cas du rappel immédiat, comme lors des rappels différés où l'enfant marchait jusqu'à l'étal de la marchande puisque l'enfant pouvait, dès qu'il était devant les fruits s'en saisir et réaliser la tâche demandée. Ainsi, dans le rappel différé simple, cette réponse devait être forte et donc difficile à inhiber. Or, le contrôle inhibiteur, qui est l'habilité à stopper une réponse inappropriée ou à inhiber une information non pertinente (Dagenbach & Carr, 1994; Dempster & Brainerds, 1995), se développe largement entre 3 et 5 ans (Gerstadt, Hong, & Diamond, 1994; Jones, Rothbart, & Posner, 2003; Simpson & Riggs, 2005a). Cette capacité est largement étudiée car elle est directement liée à la récupération en mémoire (Levy & Anderson, 2002) et au contrôle des actions (Cooper & Shallice, 2000). Ainsi, Simpson et Riggs (2007) ont utilisé un paradigme dans lequel des jeunes enfants de trois ans et demi devaient ouvrir des boîtes comportant un indice précis pour y découvrir des friandises et ne pas ouvrir des boîtes comportant un autre indice car elles étaient vides. Les auteurs ont montré que le contrôle inhibiteur était un facteur essentiel dans la réussite de cette tâche et que les erreurs produites étaient dues au fait qu'ouvrir une boîte, indépendamment de la consigne de tenir compte d'un indice, est un geste naturel et que cela suffit à en faire une réponse dominante et donc difficile à inhiber. On peut penser aussi que dans la tâche de « faire les courses », prendre les fruits pour les introduire dans le sac est une réponse dominante qui a pu être difficile à inhiber dans la condition de différé vide. D'ailleurs, il est arrivé que l'expérimentateur ait eu à faire lâcher un fruit ou ait eu à placer sa main devant les fruits pour stopper le geste de saisie de l'enfant durant la tâche en différé simple, gênant par là-même l'encodage des informations et donc les performances de maintien.

En résumé, la condition de rappel en différé simple conjugue la mise en œuvre de différentes fonctions exécutives qui chacune influence les capacités de la mémoire de travail et sont liées au contrôle attentionnel : le maintien du but (Kane, Bleckley, Conway et Engle, 2001), l'inhibition des informations non pertinentes (Friedman, Miyake, Corley,

Young, DeFries et Hewitt, 2006) et l'inhibition d'une réponse dominante au profit d'une réponse non dominante (ici, retenir son geste ; Stroop, 1935). Ces fonctions sont toutes sous dominance d'une région cérébrale en pleine maturation à cet âge (Wolfe & Bell, 2007). Le fait que ces charges cognitives se surajoutent dans cette tâche et qu'il puisse y avoir aussi des difficultés d'encodage peut expliquer, au moins en partie, pourquoi la tâche en différé simple a été aussi difficile à mettre en œuvre par ces jeunes enfants. Le manque d'attention dirigée vers les items à conserver en mémoire et peut-être aussi le but même de la tâche, du fait d'un défaut de contrôle attentionnel, a pu provoquer le déclin des traces mémorielles et leur oubli (Towse & Hitch, 1995).

La deuxième hypothèse était que la condition différée ou le délai de rétention était associé à l'exécution d'une tâche motrice impliquant un contrôle moteur modéré (i.e. marche directe vers l'étal) était facilitatrice pour les jeunes enfants. En effet, pour la variable d'empan comme pour la variable de pourcentage de fruits replacés dans une position conforme au modèle, l'introduction de la marche entraîne des performances de rappel supérieures à un rappel différé simple. De plus, lorsque l'on considère les pourcentages de fruits replacés conformément au modèle des enfants ayant les performances les plus élevées, les performances de rappel sont supérieures à un rappel différé simple, mais elles sont aussi similaires aux performances de rappel immédiat. Ainsi, l'introduction de la marche directe vers la marchande a permis, au minimum, de diminuer l'effet néfaste du temps sur les performances de rappel. Ce qui pourrait expliquer la supériorité des performances dans la condition où la charge attentionnelle était légère comparativement à la condition différée sans tâche secondaire, est que la condition avec charge attentionnelle légère pourrait s'avérer être facilitatrice pour le jeune enfant. La charge attentionnelle de cette tâche était dite modérée car la marche est automatisée à cet âge et donc peu coûteuse d'un point de vue attentionnel. Mais on peut avancer aussi, que cette condition en utilisant une marchande, a un atout inattendu, notamment par rapport à la tâche en différé simple. Marcher tout en regardant la marchande pour aller réaliser la tâche a certainement permis d'orienter efficacement le focus attentionnel et a ainsi diminué le coût cognitif du maintien en mémoire du but à atteindre, conformément au modèle ACT-R d'Anderson et al (1998). En diminuant le coût du traitement, davantage d'attention était alors disponible pour le

stockage des items à maintenir et de leur ordre (Case, 1982, 1985). En outre, le dégagement de ressources attentionnelles supplémentaires, par allègement du coût du maintien du but en mémoire, pouvait conduire à une amélioration du contrôle attentionnel. En effet, Wolfe et Bell (2007) ont montré qu'à cet âge, la maturation du cortex frontal médial est en cours. Hors, c'est cette région qui est précisément à l'œuvre dans le maintien de l'attention, la conservation du but et l'inhibition des réponses non pertinentes ou dominantes (e.g., effort de contrôle). Il est donc possible que dans la condition où les enfants marchaient directement jusqu'à l'étal de la marchande, les enfants de 5 ans ayant les capacités mémorielles les plus développées ont su tirer profit de l'aide au maintien en mémoire du but de l'activité, bénéficiant ainsi d'un meilleur contrôle attentionnel. Une autre conséquence de cette capacité supérieure de contrôle attentionnel serait une sensibilité moindre à la charge attentionnelle de la marche.

Bien entendu, ces deux explications, i.e. difficulté spécifique de la condition d'attente vide et effet positif de la marche sur la mémorisation, peuvent aussi se conjuguer. En tous les cas, cela a permis à ces enfants de 5 ans de restituer les fruits dans une position conforme au modèle de manière supérieure à un délai de rétention vide. Ainsi, l'étude de l'impact de l'activité motrice sur le maintien des informations à court terme est un champ de recherche qu'il paraît important d'explorer chez le jeune enfant. L'activité motrice permet-elle en effet de mobiliser un plus haut niveau d'activation neuronale disponible pour le maintien comme le défendent certains auteurs (Adam et al., 1997) ou permet-elle, en allégeant le maintien du but en mémoire, la mise en œuvre d'une stratégie de maintien de l'information (Anderson, 1996, 2004) ?

Cette dernière interrogation est apparue suite aux observations menées durant la passation. En effet, six enfants (dont deux ayant explicité leur « méthode ») ont employé spontanément une répétition verbale, à haute voix, durant la passation. Certains ne rappelaient que les noms des fruits (« banane-orange-raisin ») d'autres répétaient les phrases employées par l'expérimentateur, allant pour deux d'entre eux jusqu'à reproduire les intonations exactes. Une élève a aussi, sur un item, réalisé la tâche en répétant, alors même qu'elle n'avait pas regardé le modèle. Ces observations n'ont eu lieu que dans la

condition de rappel immédiat (parole accompagnant le geste) et les conditions avec charge attentionnelle légère et lourde où l'enfant « profitait » du temps de marche pour parler. Ce comportement n'a jamais été observé dans le cas du rappel différé sans charge attentionnelle. Ces résultats sont notables car, dans la littérature scientifique, la répétition ne se mettrait en œuvre qu'aux alentours de 7 ans (Baddeley et al., ; Barrouillet et al, 2009 ; Tam, Jarrold, Baddeley, & Sabatos de Vito, 2010 pour une mise en évidence à 6 ans) et le développement de cette stratégie conditionnerait l'amélioration des performances de mémoire de travail. Or, ici, les enfants n'ont que 5 ans et, bien qu'ils ne mettent pas en œuvre une répétition subvocale, ils utilisent tout de même une répétition orale qui pourrait en être une prémisse. Plus généralement, Vygotski (1934) stipulait que « pour internaliser, il faut d'abord externaliser ». Ce comportement de répétition orale est largement utilisé à l'école maternelle française lors de l'apprentissage de comptines (par imitation de l'enseignant), ce qui pourrait expliquer qu'il soit observé si tôt dans notre étude, les autres études de référence étant toutes anglo-saxonnes (où il n'y a pas d'école maternelle). La scolarisation précoce pourrait donc avoir pour conséquence positive le développement précoce de certaines stratégies mémorielles, lesquelles sont un déterminant puissant de l'augmentation des capacités de mémoire de travail (Siegler, 1999). En tous les cas, il apparaît que, même à 5 ans, les enfants pourraient être capables de mettre en œuvre des stratégies de maintien de l'information si la condition de rappel, par ses caractéristiques intrinsèques, le permet. En effet, le fait de garder très actif le but à atteindre (soit par l'action immédiate soit par la vue de l'objectif, la marchande) pourrait permettre le déclenchement d'une stratégie de maintien. Ceci rejoint d'ailleurs le modèle ACT-R d'Anderson (1998) : les rappels immédiat ou différés utilisant l'objet marchande réuniraient les conditions de déclenchement de la production liée à la répétition verbale.

En conclusion, on peut dire que cette étude a atteint un certain nombre de ses objectifs. Le paradigme présenté est réalisable par des enfants de 5 ans et suffisamment sensible pour mettre en lumière les différences de traitement liées à l'introduction d'un délai et d'une tâche concurrente au maintien. L'étude de la mémoire du jeune enfant va donc pouvoir s'étendre à une tranche d'âge plus étendue, de 2 à 6 ans. D'autre part, l'étude fait apparaître deux éléments intéressants. Premièrement, les performances diminuent dans

le cas d'un rappel différé mais notre étude ne permet pas de déterminer comment se fait l'oubli et surtout, comment il évolue d'un point de vue développemental. Aussi, le chapitre 2 de cette partie expérimentale rapportera 3 études portant sur la vitesse d'oubli de l'information à court terme au cours du développement en testant des enfants de 2 ans et demi à 6 ans. Deuxièmement, au sein des rappels différés, les performances diminuent drastiquement dans le cas d'une attente passive de l'enfant alors que les performances semblent peu diminuer, voire rester stables, dans le cas de la mise en œuvre d'une activité motrice. Le troisième chapitre de cette partie expérimentale se consacrera donc à déterminer si l'activité motrice en elle-même est facilitatrice pour le maintien des informations à court terme, ou bien si la vue de la marchande, en diminuant le coût cognitif du maintien du but en mémoire, améliore les performances de rappel en permettant, peut-être la mise en œuvre d'une stratégie active de maintien.

7. Vitesse d'oubli de l'information chez le jeune enfant

La mémoire de travail est une mémoire de stockage temporaire qui permet de maintenir active, pendant un temps court, la représentation d'un stimulus après qu'il ait disparu du champ perceptif, et ce, afin de l'utiliser dans une tâche cognitive (Reznick, 2009). Dans la littérature, il existe deux principaux courants de recherche, chacun étant caractéristique de l'étude d'une période d'âge. Alors que les études chez les nourrissons et les très jeunes enfants s'intéressent, pour la plupart, à la durée durant laquelle la représentation de l'information peut être maintenue en mémoire, les études chez l'enfant et l'adulte tentent plutôt d'évaluer la quantité d'informations que les sujets peuvent maintenir, c'est-à-dire leur capacité mémorielle. Ainsi, l'objectif des expériences conduites durant ce travail de thèse et rapportées dans ce chapitre était double. Tout d'abord, il s'agissait de proposer des paradigmes faisant se rejoindre les deux courants de recherche précités, autant par les objectifs visés que par la population étudiée. Ainsi, la capacité mémorielle d'enfants entre 2 et 6 ans ainsi que la durée de rétention de l'information ont été évaluées au travers de deux paradigmes. Le deuxième objectif de l'étude conduite et rapportée dans ce chapitre était de quantifier la vitesse de l'oubli de l'information au cours du temps chez le jeune enfant. En effet, la vitesse de déclin temporel de l'information en mémoire est l'un des principaux facteurs mentionnés pour expliquer l'augmentation développementale de la capacité en MDT. Pourtant, celle-ci n'a jamais été quantifiée chez les jeunes enfants.

Le premier point de cette introduction présentera donc les deux courants de recherche que nous proposons de se faire se rejoindre au travers des trois expériences rapportées ici, leurs objectifs spécifiques et les résultats principaux qu'ils ont permis de mettre en évidence. Le deuxième point de l'introduction présentera les trois facteurs limitant la MDT selon le modèle dans lequel s'inscrit cette recherche, i.e. le TBRS (Barrouillet et al., 2004, 2009), notamment la vitesse de déclin de l'information. Enfin, le troisième point de l'introduction présentera les arguments en faveur de l'utilisation d'une nouvelle approche de recherche dans l'évaluation de la vitesse d'oubli de l'information, i.e. une étude chez le jeune enfant. En effet, les résultats des études menées chez les enfants plus grands et les

adultes sont inconsistants et l'étude de la vitesse d'oubli de l'information est particulièrement pertinente entre 2 et 6 ans du fait de l'absence de mécanisme de maintien de l'information (Camos & Barrouillet, 2011). Enfin, les trois expériences menées sur ce sujet au sein de ce travail de thèse seront alors rapidement décrites avant d'être détaillée individuellement.

7.1. Deux courants de recherche : objectifs spécifiques aux âges étudiés

La capacité à maintenir des représentations en mémoire a été mise en évidence dès l'âge de 5-6 mois grâce au paradigme de réponse différée (Pelphrey & Reznick, 2002 pour une revue ; Reznick, 2009). Ce paradigme, procédure canonique utilisée pour étudier les performances de maintien à court terme chez les jeunes et très jeunes enfants a été largement utilisée dans les années 90. Dans sa version originale, la tâche consiste à cacher un objet convoité par l'enfant (e.g. un jouet) dans une boîte posée parmi d'autres, puis d'imposer un délai de rétention durant lequel l'expérimentateur s'engage dans une interaction avec l'enfant, ou bien lui cache les yeux, ou encore le détourne de l'objet (Hunter, 1917). Finalement, après un délai de rétention plus ou moins long, l'enfant peut retourner chercher l'objet. S'il va chercher l'objet où il est effectivement caché, alors on peut en conclure qu'il se souvient de l'emplacement de la cachette. Chez les nourrissons, l'indice utilisé peut-être un comportement d'orientation de la tête vers l'emplacement de l'objet caché. Ainsi, l'étude d'Hunter (1917) définissait implicitement la capacité de la MDT comme le délai durant lequel l'emplacement de l'objet caché pouvait être maintenu par l'enfant. Ainsi, l'amélioration développementale consiste en une augmentation constante du temps durant lequel une représentation peut être maintenue. Par exemple, dans une tâche de réponse différée comprenant deux localisations, la durée de maintien augmente linéairement au long de la toute petite enfance, passant d'un maintien de 2 secondes à 7 mois de vie à un maintien d'une durée de 12 secondes à 12 mois (Diamond & Doar, 1989). Bien que les mécanismes potentiellement responsables de cette augmentation du délai de rétention restent partiellement inconnus, deux facteurs sont fréquemment mentionnés. Le premier facteur est le développement structurel et fonctionnel du système nerveux central,

particulièrement intense durant la petite enfance du fait de la maturation neuronale, et le deuxième facteur est l'augmentation de la vitesse et de l'efficacité du traitement de l'information (Dempster, 1985 ; Diamond, Prevor, Callender, & Druin, 1997; Huttenlocher, 1979; Kail, 1992).

Contrastant avec ce courant de recherches portant sur la limite temporelle de la MDT, les études menées avec les enfants plus grands, à partir de 6 ou 7 ans, se focalisent essentiellement sur l'augmentation de la capacité en MDT selon le versant spatial, c'est-à-dire le nombre d'informations pouvant être maintenues en mémoire. Typiquement, les tâches de MDT impliquent le maintien de certains éléments en mémoire (e.g. lettres, chiffres, emplacements de pastilles) dont la présentation est entrecoupée d'épisodes de traitement (e.g. compter des pastilles, lire des phrases, résoudre des problèmes...). L'empan en MDT, déterminé par le nombre maximal d'éléments pouvant être rappelés en utilisant une procédure de ce type, augmente fortement avec l'âge (Barrouillet, Gavens, Vergauwe, Gaillard, & Camos, 2009; Bayliss, Jarrold, Baddeley, Gunn & Leigh, 2005 ; Gathercole, 1999; Gathercole, Pickering, Ambridge, & Porter, 2004). De nombreuses études prennent d'ailleurs en compte cette augmentation dans l'étude du fonctionnement de la MDT (Barrouillet & Gaillard, 2011). Cependant, les facteurs invoqués pour expliquer une telle augmentation sont encore source de débat.

7.2. Les trois facteurs limitant la MDT selon le TBRS

Dans le modèle du partage temporel des ressources, les auteurs ont identifié trois facteurs principaux limitant la MDT, ceux-ci étant généralement invoqués comme limitant également le développement : la quantité d'attention disponible, les mécanismes de maintien et la vitesse de déclin de l'information (Barrouillet, Bernardin, Camos, 2004; Barrouillet, et al., 2009 ; Camos & Barrouillet, 2011a).

L'AUGMENTATION DE LA QUANTITE D'ATTENTION DISPONIBLE

L'augmentation de la quantité d'attention disponible a déjà été mise en évidence par les auteurs du modèle (Barrouillet & Camos 2001; Gaillard, Barrouillet, Jarrold, & Camos, 2011; Gavens & Barrouillet, 2004), mais aussi au sein d'autres cadres théoriques. Ainsi, dès

1970, Pascual-Leone évoquait l'augmentation des ressources du système, (i.e., l'augmentation de la puissance mentale, M-Power) comme facteur de développement. L'augmentation de la quantité d'attention disponible entraîne une meilleure efficacité de traitement. Ainsi, dans les tâches de MDT comme la tâche d'empan de comptage, le comptage des points demandent moins d'attention aux enfants plus âgés ce qui libère des ressources pour maintenir les items à mémoriser. Par conséquent, les performances de rappel sont plus élevées chez les enfants plus âgés (Case, Kurland, & Goldberg, 1982). Cependant, s'opposant à cette idée de partage des ressources entre maintien et traitement, Towse et Hitch (1995 ; Towse, Hitch, et Hutton, 1998) proposent une hypothèse alternative. Ils suggèrent que l'augmentation développementale des capacités mémorielles serait liée à l'amélioration de l'efficacité du traitement. Du fait d'une efficacité accrue du comptage, de la lecture ou encore de la résolution de problèmes, le traitement serait plus rapide ce qui entraînerait la diminution du délai de rétention des informations à maintenir, favorisant ainsi leur rappel.

L'EMERGENCE DES MECANISMES DE MAINTIEN

Outre le développement drastique des ressources attentionnelles disponibles, l'augmentation développementale de la MDT est souvent expliquée par l'émergence de mécanismes de maintien de l'information, comme la répétition subvocale et le rafraîchissement attentionnel. Concernant ces deux mécanismes de maintien, une évolution majeure se produirait aux alentours de l'âge de 7 ans. La répétition subvocale, largement étudiée, verrait des changements qualitatifs dans l'utilisation de la répétition par les enfants avant et après 7 ans (Henry, 1991a, 1991b ; mais voir Tam et al., 2010, pour une preuve de l'utilisation de la répétition à 6 ans). De plus, alors que Baddeley et al. (1975) ont suggéré qu'une corrélation positive entre la vitesse d'articulation et l'empan mémoriel est un indice de l'utilisation de la répétition subvocale (i.e., une vitesse plus rapide permettant de répéter davantage d'éléments), cette corrélation est souvent non significative chez les enfants de moins de 7 ans (Cowan, 1992 ; Gathercole & Adams, 1993 ; Gathercole, Adams & Hitch, 1994). En outre, alors que le rappel des enfants plus âgés et des adultes est réduit lorsqu'ils mettent en œuvre une articulation concurrente durant l'épisode de traitement (i.e., répéter une syllabe afin de bloquer la répétition subvocale), les performances des enfants de 5 ans

ne sont pas altérées par la suppression articulatoire (Gathercole, Willis, et Baddeley , 1992). Enfin, l'effet de similarité phonologique (i.e., performance de rappel inférieure lorsque les items à retenir se ressemblent au niveau phonologique plutôt que lorsqu'ils sont différents, effet qui signe l'utilisation de codes verbaux dans le maintien) n'est pas observé chez les enfants avant 7 ans alors même que les enfants de cet âge sont sensibles à l'effet de similarité visuelle (Hitch, Halliday, Dodd, & Littler, 1989 ; Hitch, Halliday, Schaafstal, &Heffernan, 1991; mais voir Henry, Messer, Luger -Klein, & Crane, 2012, pour une absence d'effet de similarité visuelle à 5 ans). Ainsi, tous ces résultats conduisent à conclure que les enfants avant 7 ans encoderaient préférentiellement les informations sous un mode visuel, alors qu'ils utiliseraient un code phonologique après 7 ans. Tous ces arguments sont bien en faveur d'un changement qualitatif notable dans la mise en œuvre de la répétition subvocale, changement qui surviendrait aux alentours de 7 ans.

De la même manière, la trajectoire développementale du rafraîchissement attentionnel (i.e., un mécanisme de maintien lié à l'attention, Barrouillet et al., 2004, 2007 ; Cowan, 1995 ; Johnson, 1992 ; McCabe, 2008) est marquée par un changement qualitatif à 7 ans. Le rafraîchissement attentionnel est un processus de récupération ou de reconstruction rapide de l'information par focalisation attentionnelle sur les éléments à maintenir, laquelle fait augmenter le niveau d'activation des traces mémorielles dans le système. Dans le TBRS (Barrouillet et al., 2004, 2007), le rafraîchissement attentionnel ne peut s'opérer qu'entre les épisodes de traitements car l'attention ne peut être dévolue qu'à un seul élément à la fois, stockage ou traitement. Ainsi, dans une situation de double tâche, c'est la charge cognitive de la tâche distractive qui détermine si le sujet va pouvoir mettre en œuvre ou non un rafraîchissement attentionnel. La charge cognitive dépend du temps durant lequel la tâche va monopoliser l'attention. En effet, la même tâche (e.g. additionner 2 et donner le résultat par exemple) va demander beaucoup plus d'attention si elle est répétée 4 fois dans un intervalle de temps que si elle est répétée 2 fois durant ce même intervalle de temps. Si la tâche concurrente au maintien monopolise l'attention durant un temps long, c'est-à-dire si la charge cognitive de cette tâche est maximale par rapport aux capacités du sujet, les traces mémorielles voient leur activation diminuer et elles deviennent alors irrécupérables car le rafraîchissement attentionnel ne peut se mettre en œuvre avant le déclin total des informations. Barrouillet et al. (2009) ont ainsi montré que l'efficacité du rafraîchissement

attentionnel ne fait que croître de 7 à 14 ans, les enfants plus âgés alternant plus aisément entre traitement et stockage et tirant meilleur profit de la diminution de la charge attentionnelle de la tâche distractive pour ce faire. A l'opposé, la performance des enfants de 6 ans ne dépend pas, quant à elle, de la charge attentionnelle de la tâche distractive mais bien de sa durée (Camos & Barrouillet, 2011a, 2011b). Ce dernier résultat suggère que, même lorsque la charge attentionnelle de la tâche distractive est légère, les enfants de 6 ans ne mettent pas en œuvre spontanément de rafraîchissement attentionnel et perdent alors l'information au cours du temps.

Ainsi, les jeunes enfants, avant 6 ans, ne semblent pas mettre en œuvre spontanément une stratégie de maintien de l'information, que ce soit la répétition subvocale ou le rafraîchissement attentionnel. Par conséquent, entre 2 et 6 ans, comme chez les nourrissons et les tout-petits, le maintien de l'information en MDT ne devrait être affecté que par le seul passage du temps. Les performances de rappel dans la petite enfance devraient donc dépendre uniquement du délai entre la présentation des items à mémoriser et le rappel. La vitesse à laquelle les traces mémorielles s'effacent est donc un paramètre majeur des capacités mémorielles des sujets. Savoir comment elle évolue au cours du développement est par conséquent une question cruciale et c'est pour cela qu'elle sera le cœur des études rapportées dans ce chapitre.

LA VITESSE DE DECLIN

Certaines études ont déjà exploré l'effet du délai de rétention chez les enfants et les adultes (Cowan, Nugent, Elliott, et Sauls, 2000 ; Keller & Cowan, 1994 ; Sauls & Cowan, 1996). Pour empêcher la mise en œuvre de stratégies de maintien qui, à ces âges, contrecarrent l'effet du délai de rétention, les auteurs ont évalué l'effet du délai de rétention sur des lettres, du discours ou des sons de différentes tonalités, stimuli qui étaient censés être ignorés. Cependant, les résultats quant aux changements développementaux de la vitesse du déclin de l'information avec le temps sont assez divergents en fonction des études. D'une part, une augmentation développementale du délai de rétention a été mise en évidence entre 6-7 ans et l'âge adulte pour les sons de différentes tonalités (Keller & Cowan, 1994), de même que pour le discours de 7-9 ans à l'âge adulte (Sauls & Cowan,

1996, Exp.2). D'un autre côté, Sauls et Cowan (1996) ont observé dans une autre expérience une vitesse similaire d'oubli du discours entre 7 et 10 ans. Plus récemment, Cowan et al. (2000) ont montré, à l'aide d'un paradigme s'ajustant aux capacités des sujets (i.e., la longueur de la série à maintenir en mémoire étant adaptée à l'empan de chaque participant), que la perte d'information, à travers des intervalles de rétention, était équivalente entre 8 et 11 ans. Ainsi, la littérature rapporte des résultats qui ne permettent pas à présent de conclure sur une quelconque modification de la vitesse de l'oubli de l'information au cours du développement.

7.3. Etudier la vitesse de déclin de l'information chez le jeune enfant

Du fait que la littérature fait mention de résultats divergents sur la vitesse de déclin de l'information, les études présentées dans ce chapitre visent à réexaminer cette problématique à l'aide d'une nouvelle approche de recherche. Au lieu d'évaluer la vitesse de l'oubli à la fin de l'enfance, ce qui nécessite de bloquer les mécanismes de maintenance, nous avons choisi d'évaluer une population qui n'en utilise pas spontanément. Comme expliqué ci-avant, c'est le cas des enfants avant 7 ans. Avant 7 ans, les enfants n'utilisent pas spontanément de mécanisme de maintien de l'information en mémoire, lequel ne souffre donc que du passage du temps. Il n'est donc pas nécessaire d'utiliser une procédure compliquée où le sujet doit rappeler des informations qu'il est censé ignorer (Cowan et al., 2000), ou d'imaginer l'introduction de tâches secondaires de charge cognitive suffisamment élevée (Barrouillet et al., 2004, 2009) pour empêcher la mise en œuvre de mécanismes de maintien par une orientation exclusive de l'attention sur le traitement de l'information.

La procédure à utiliser est simple chez les jeunes enfants puisqu'elle consiste à présenter les items à maintenir et à faire varier ensuite le délai de rétention avant rappel. Toutefois, bien que l'étude ne rencontre pas de difficulté méthodologique liée au blocage des mécanismes de maintien, une méthode d'évaluation adaptée aux jeunes enfants a dû être imaginée, et ce, pour deux raisons. Tout d'abord, les procédures d'évaluation habituellement utilisées pour évaluer les capacités de MDT à la fin de l'enfance et à l'âge

adulte requièrent la compréhension d'instructions plus ou moins complexes et ont tendance à utiliser des réponses verbales ce qui n'est pas adapté aux jeunes enfants. D'autre part, les procédures reconnues dans l'évaluation des nourrissons et des jeunes enfants (ie.g., la recherche d'un objet unique dans la procédure de réponse différée) ne sont pas appropriées non plus. Par exemple, le maintien d'une information unique (i.e., la localisation d'un objet) va rapidement entraîner un effet plafond chez l'enfant.

Les deux paradigmes d'évaluation de la MDT présentés dans ce chapitre s'inspirent des deux courants de recherche précédemment cités et reprennent le paradigme de *Brown-Peterson*, celui-ci étant toutefois adapté aux jeunes enfants (Brown, 1958 ; Peterson et Peterson, 1959). Comme chez les nourrissons et les très jeunes enfants, les sujets avaient à reproduire un modèle caché, après différents délais. Cependant ce modèle consistait en des séries d'objets de longueur croissante comme cela est habituellement utilisé chez les enfants plus âgés pour déterminer les capacités mémorielles en MDT. En outre, pour être attrayant pour les jeunes enfants ces nouvelles tâches étaient présentées comme un jeu qui visait à «faire les courses comme maman» ou à «faire faire une course de ski à de petites poupées». Dans ce deuxième paradigme, non encore décrit, il était demandé à des enfants de reproduire des courses de ski à l'aide de petites poupées en bois.

Ainsi, au travers du paradigme de la marchande déjà utilisé dans la première expérience, deux nouvelles expériences ont été menées. La première a concerné des enfants de 4 à 6 ans à qui il a été demandé de reproduire des séries de fruits immédiatement après la présentation du modèle ou après un délai de 2, 4 ou 6 secondes. La deuxième étude a été menée auprès d'enfants de 2 à 3 ans et demi à qui il a été demandé de reproduire, là aussi, des séries de fruits immédiatement après la présentation du modèle ou après un délai de 3 à 5 secondes. Dans une dernière expérience, des enfants de 4 à 6 ans devaient reproduire des courses de ski de petites poupées en bois en les faisant descendre le long d'une piste en bois. Les séries ont été reproduites immédiatement après la présentation du modèle ou après un délai de 4, 8 ou 12 secondes. Que ce soit dans l'un ou l'autre paradigme et, contrairement aux études classiques menées précédemment chez les enfants, l'introduction d'un délai de rétention prenait du sens pour les jeunes enfants. En effet, dans le paradigme de la marchande, les enfants devaient attendre que le magasin soit ouvert pour prendre les

fruits. Ainsi, attendre l'ouverture du magasin permettait aux jeunes enfants de garder leur attention sur la tâche à réaliser. Dans le paradigme de la course de ski, les enfants devaient attendre le signal du début de la course pour réaliser la tâche. Là encore, les enfants n'attendaient pas uniquement parce qu'on leur demandait de le faire, mais restaient concentrés sur la tâche en attendant le signal du début de la tâche. Ainsi, le délai de rétention prenait du sens dans chacun des paradigmes et était parfaitement intégré à l'histoire du paradigme lui-même. Cette approche originale permettait de s'éloigner d'une tâche de laboratoire pour se rapprocher d'une situation de jeu, plus à même d'aider les jeunes enfants à restés attentifs sur la tâche à réaliser.

Les hypothèses théoriques étaient identiques pour les trois études. Outre l'augmentation des performances avec l'âge, il était prédit que les performances diminueraient au cours du temps du fait de l'absence de mise en œuvre des mécanismes de maintien de l'information. En effet, les traces mémorielles devraient se dégrader au cours du temps du fait que l'oubli ne peut être contrecarré par un mécanisme de maintien chez les enfants de moins de 7 ans (Camos & Barrouillet, 2011a, 2011b). Enfin, afin d'observer les changements développementaux potentiels dans la vitesse de déclin de l'information en mémoire, la pente liée à l'effet néfaste du temps sur le maintien des items en mémoire a été calculée et comparée entre les groupes d'âges au sein de chaque expérience.

Expérience 2

L'expérience rapportée ici avait deux objectifs. Le premier objectif était, au travers d'un paradigme original, de faire se rejoindre les deux courants de recherche utilisés dans l'étude des capacités mémorielles. Ainsi, le paradigme de « la marchande » a permis à la fois de quantifier le nombre d'éléments pouvant être maintenus par des enfants entre 4 et 6 ans mais aussi le déclin temporel de l'information. D'autre part, la littérature rapporte des résultats divergents concernant la vitesse de déclin de l'information en mémoire au cours du temps. Notre deuxième objectif était donc de proposer une approche originale en évaluant la vitesse d'oubli chez les jeunes enfants, soit entre 4 et 6 ans. En effet, les enfants avant 7 ans ne mettant pas en œuvre spontanément de mécanisme de maintien de l'information (Camos et Barrouillet, 2011), cette tranche d'âge est particulièrement propice pour évaluer la vitesse à laquelle l'information décline en mémoire.

Ainsi, dans l'étude 2, quatre-vingt-dix-sept enfants de 4 à 6 ans ont eu à reproduire des séquences de fruits pour « faire les courses comme maman » en introduisant des fruits en plastique dans un sac transparent à l'identique du modèle présenté par l'expérimentateur. Afin d'adapter la difficulté de la tâche à l'âge des enfants, trois fruits étaient proposés aux enfants de 4 ans qui reproduisaient donc des séries de 1 à 3 fruits, quatre fruits étaient proposés aux 5 ans pour réaliser des séries de 1 à 4 fruits, et 5 fruits étaient proposés aux 6 ans pour réaliser des séries de 1 à 5 fruits. Chaque sujet complétait 4 essais par longueur de fruits et passait toutes les conditions de rappel en deux sessions expérimentales. Le rappel pouvait s'effectuer immédiatement après la présentation du modèle, ou bien après un délai de 2, 4 ou 6 secondes.

On s'attendait à ce que l'empan augmente avec l'âge. De plus, du fait de l'absence de la mise en œuvre des mécanismes de maintien avant 7 ans, on s'attendait à ce que l'empan diminue avec le temps qui passe.

METHODE

Participants

Quatre-vingt-dix-sept enfants de maternelle de 4 ans (32 enfants, âge moyen = 3 ans 8 mois, étendue de 3 ans 3 mois à 4 ans 2 mois, 18 garçons), 5 ans (33 enfants, âge moyen = 4 ans et 8 mois, étendue de 4 ans 3 mois à 5 ans 2 mois, 16 garçons) et 6 ans (32 enfants, âge moyen = 5 ans et 9 mois, étendue de 5 ans 3 mois à 6 ans et 2 mois, 11 garçons) ont participé à l'étude 2. Tous les enfants étaient francophones et aucun n'était connu comme étant daltonien. Ils étaient issus de 5 écoles maternelles de milieu rural en Bourgogne. L'accord des parents avait été sollicité au préalable.

Matériel et Procédure

L'expérimentateur et l'enfant étaient installés face à une épicerie en bois, chacun ayant à sa disposition un sac en plastique transparent de forme tubulaire. Une boîte, posée sur le stand de l'épicerie contenait des fruits en plastique (banane, citron, raisin, orange et tomate) facilement identifiables par les enfants, de par leurs formes et couleurs.

Au cas où les enfants se seraient appuyés sur des codes verbaux, les fruits ont été choisis afin que leurs noms soient tous oralement bisyllabiques en français et que leur âge objectif d'acquisition soit de 4 ans ou antérieur (Chalard, Bonin, Méot, Boyer, & Fayol, 2003). Suite à des pré-tests, et afin d'éviter des échecs persistants dus à des séries dépassant la capacité mémorielle des sujets, la longueur maximale des séries proposées à chaque âge a été adaptée. Ainsi, le nombre de fruits dans la boîte (chaque fruit étant en un seul exemplaire) était différent selon l'âge, soit 3 fruits à 4 ans, 4 fruits à 5 ans et 5 fruits à 6 ans. Le nombre maximum de fruits dans la boîte déterminait aussi la longueur maximale des séries à mémoriser.

La passation commençait lorsque l'expérimentateur prenait un fruit de la boîte et le mettait dans son sac, l'enfant regardant la scène. Après que le sac de l'expérimentateur ait été caché derrière un écran, l'enfant devait reproduire la série en introduisant les mêmes fruits dans son propre sac, et ce, dans le même ordre. Après quatre essais avec un fruit,

l'expérimentateur augmentait le nombre de fruits placés dans le sac, jusqu'à parvenir au nombre maximum de fruits présents dans la boîte (i.e., 3, 4 ou 5 fruits pour les enfants de 4, 5 et 6 ans respectivement). La procédure comptait quatre essais par longueur et chaque sujet devait accomplir chacune des 4 conditions expérimentales de rappel. Ainsi, l'enfant devait reproduire la série de fruits, soit immédiatement après que le sac soit caché, soit après un délai de 2, 4 ou 6 secondes. Pendant ce délai, l'enfant devait tout simplement attendre l'ouverture de « l'épicerie », c'est-à-dire l'ouverture de la boîte. Un dispositif électronique permettait de régler l'ouverture de la boîte par le biais d'une minuterie (Figure 7.1).



Figure 7.1 Boîte et son dispositif électronique d'ouverture minutée

Les sujets ont effectué les quatre conditions expérimentales de rappel en deux sessions espacées d'environ une semaine. Chaque session comptait 2 conditions de rappel mais jamais les deux courtes ensemble (i.e., immédiat et 2 secondes de délai), ni les deux plus longues ensemble (i.e., 4 et 6 secondes de délai). A l'intérieur de chaque groupe d'âge, deux enfants ont été affectés à chacun des 16 ordres possibles. La première session expérimentale débutait par une discussion entre l'expérimentateur et l'enfant afin de vérifier que les fruits étaient reconnus et différenciés des autres fruits. Cet échange verbal avait aussi pour but d'établir une relation détendue entre l'enfant et l'expérimentateur, ce qui était nécessaire pour s'assurer de la collaboration de l'enfant à la tâche, notamment des plus jeunes. Ensuite, la tâche était expliquée à l'aide de trois cubes colorés. Le sac de l'expérimentateur restant visible pour le premier essai, l'enfant ayant juste à le copier. Pour les autres essais, le sac était caché. L'entraînement durait jusqu'à ce que l'enfant réussisse la

tâche au moins une fois avec un essai caché. Un ou deux essais étaient généralement suffisants.

RESULTATS

Après avoir analysé les résultats concernant l'empan en mémoire et l'empan corrigé, le rapport à la chance étant différent selon les âges du fait d'un nombre de fruits différents dans la boîte (i.e., 3, 4 et 5 fruits à 4, 5 et 6 ans respectivement), le type d'erreurs commises par les enfants a été analysé. Puis, parce que les erreurs commises étaient majoritairement des erreurs ayant attiré à l'ordre d'introduction des fruits dans le sac, les résultats ont été analysés sans tenir compte de l'ordre. Enfin, les données des essais à 1 fruit, seuls essais dans lesquels le maintien de l'ordre n'était pas nécessaire, ont été analysées.

Notons que les données d'un enfant de 5 ans ont été écartées de l'analyse statistique, ses performances se situant à 2 écarts-types en dessous de la moyenne de son groupe d'âge. Enfin, puisque l'effet d'ordre de présentation des conditions expérimentales n'est jamais apparu comme étant significatif, ce facteur n'a pas été inclus dans les analyses suivantes.

Empan en mémoire

Un empan moyen en mémoire a été calculé pour chaque enfant et pour chaque condition expérimentale de rappel. La méthode utilisée était la même que dans l'étude 1 et dans de nombreuses études d'empan complexe manipulant des essais de longueur croissante (i.e., Barrouillet et al., 2009 ; Smith & Scholey, 1992). Un quart de point était attribué à chaque essai réussi (i.e., items et ordre corrects) pour chaque condition expérimentale. Par exemple, quatre essais réussis avec un fruit, trois essais réussis avec deux fruits, deux essais réussis avec trois fruits et aucun essai réussi avec quatre et cinq fruits conduisait à un empan moyen de $1 + 0.75 + 0.5 = 2,25$ items. Aucun enfant n'a eu de performance correspondant à un effet plafond (Figure 2.6).

Une analyse de variance (ANOVA) a été conduite sur l'empan moyen avec l'âge (4, 5 et 6 ans) comme facteur inter-sujets, et le délai avant rappel (0, 2, 4 et 6 secondes) comme

facteur intra-sujet. Les performances de rappel augmentaient avec l'âge, $F(2,93)=28.32$, $p<.0001$, $\eta^2=.38$ (Figure 7.2). Les enfants de quatre ans ont eu des performances inférieures (1.74) à celles des enfants de 5 ans ayant eux-mêmes des performances inférieures (2.36) à celles des enfants de 6 ans (2.67), $ps<.01$.

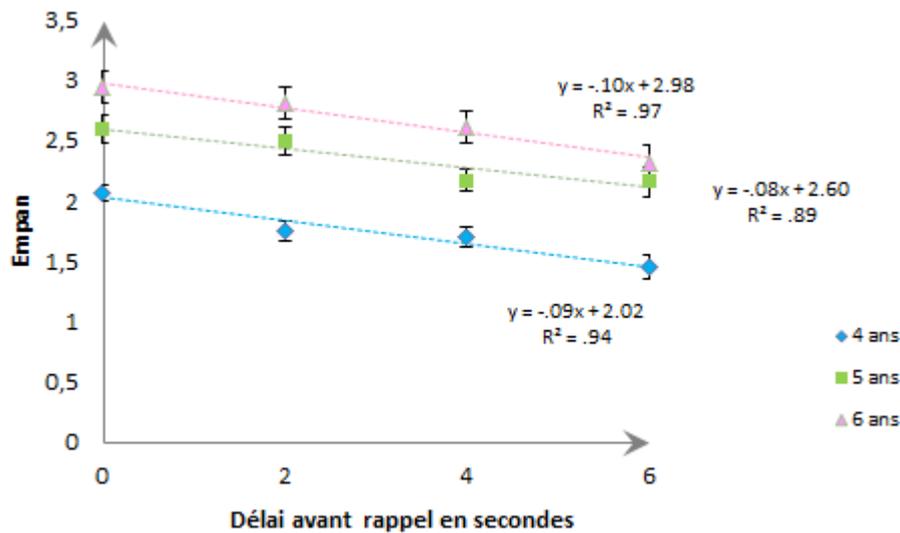


Figure 7.2 Empan moyen en fonction du délai entre la présentation du modèle et la réalisation par l'enfant (0, 2, 4 et 6 secondes) et l'âge (4, 5 et 6 ans). Les barres représentent l'erreur standard.

En outre, une augmentation du délai entre la présentation des fruits et la réalisation par l'enfant avait un impact négatif sur les performances $F(3,279)=51.80$, $p<.0001$, $\eta^2=.36$. Cette diminution de l'empan au cours du temps était similaire dans les trois groupes d'âge, l'interaction entre l'âge et le délai n'étant pas significative, $F(6,279)=1.49$, $p=.18$, $\eta^2=.03$, $p_{BIC}(H_0|D)>0.99$, (Masson, 2011; Wagenmakers, 2007). Pour aller plus loin dans l'analyse, les pentes de régression linéaire ont été calculées pour chaque enfant et utilisées comme variable dépendante dans une ANOVA avec l'âge comme facteur inter-sujet. La valeur de la pente moyenne est assez similaire dans les trois groupes d'âges (-.09 à 4, -.08 à 5 ans, -.10 à 6 ans), $F < 1$, $p_{BIC}(H_0|D)>0.98$. De la même manière, les valeurs de l'ordonnée à l'origine ont été calculées pour chaque enfant. Au contraire des résultats obtenus à partir des pentes de régression, les trois groupes d'âge diffèrent quant aux valeurs d'interception des droites avec l'origine (2.02, 2.62 et 2.98 à 4, 5 et 6 ans respectivement), $F(2,93)=26.97$, $p<.0001$, $\eta^2=.37$.

Ces dernières analyses confirment donc les résultats précédents. L'empan augmentent avec l'âge mais les enfants sont affectés de la même manière par le temps qui

passé, et ce quel que soit l'âge, entre 4 et 6 ans. Pour illustrer cette tendance, les droites de régression ont été incluses dans la figure 7.2.

Empan corrigé

Parce que le nombre de fruits parmi lesquels les enfants choisissaient variait en fonction de l'âge, le rapport à la chance était différent d'un âge à l'autre. En effet, dans l'exemple des essais à 1 fruit, la probabilité que le sujet choisisse le fruit correct par hasard était de .33 à 4 ans, alors qu'il était de .25 à 5 ans et de .20 à 6 ans. L'empan moyen qu'un enfant pouvait obtenir en prenant les fruits au hasard a donc été calculé en fonction de l'âge des sujets. Afin d'expliquer le calcul de cet empan dû au hasard, considérons l'exemple de l'empan qu'un enfant de 4 ans pourrait obtenir grâce à la chance, en choisissant parmi les 3 fruits de sa boîte. La probabilité de choisir le fruit correct par chance dans les essais à 1 fruit était de $1/3$, soit $1/3 \times 4$ pour les 4 essais de cette longueur. Dans les essais à 2 fruits, la probabilité de choisir les 2 fruits corrects par chance était de $1/3 \times 1/2$, soit $1/6 \times 4$ pour les 4 essais de cette longueur. Dans les essais à 3 fruits, la probabilité de choisir les 3 fruits par chance était la même qu'à 2 fruits étant donné qu'après le choix des 2 premiers fruits, l'enfant ne pouvait prendre que le fruit restant dans la boîte, soit là encore $1/6 \times 4$ pour les 4 essais. Pour calculer l'empan pouvant être dû à la chance, ces valeurs ont été additionnées ($4/3+4/6+4/6$) puis multipliés par $1/4$, chaque essai réussi valant un quart de point. Procédant de la même façon pour les enfants de 5 et 6 ans, les empan moyens pouvant être dus à la chance étaient donc de .67 point à 4 ans, .42 à 5 ans et .28 points à 6 ans. Ces valeurs ont été soustraites aux empan moyens afin d'obtenir les empan corrigés de chaque enfant pour chaque condition expérimentale.

Une analyse de variance similaire à celle réalisée sur l'empan moyen a été conduite sur les empan corrigés. Elle montre les mêmes tendances. Les enfants plus âgés ont rappelé davantage d'items (2.39) que les enfants de 5 ans (1.87) qui ont eux-mêmes de meilleures performances de rappel que les plus jeunes (1.07), $F(2,93)=56.34$, $p<.0001$, $\eta^2 =.55$ (voir Figure 7.3). En outre, cette analyse réplique l'effet délétère du délai entre la présentation du modèle et la réalisation par l'enfant sur les performances de rappel, $F(3,279)=51.81$, $p<.0001$, $\eta^2 =.37$, ainsi que l'absence d'interaction entre l'âge et le délai, $F(6,279)=1.49$,

$p=.18$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.99$.

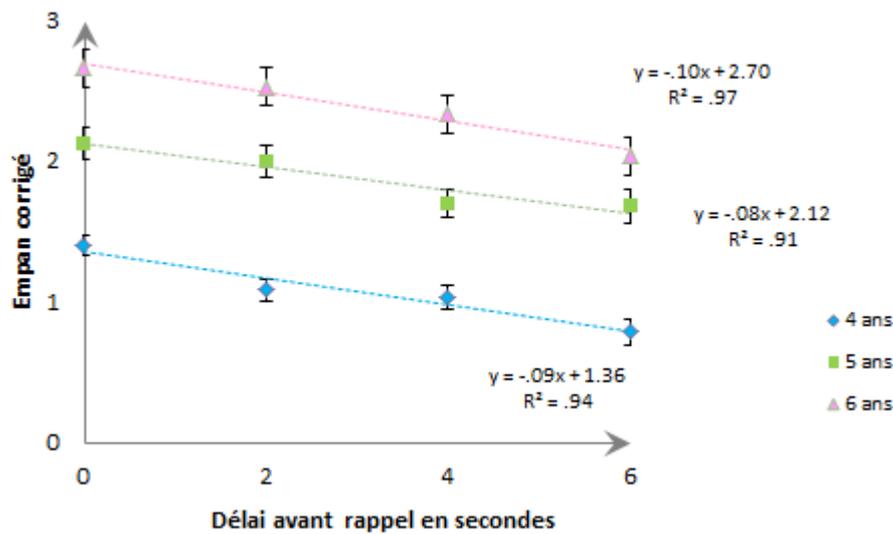


Figure 7.3 Empan corrigé en fonction du délai entre la présentation du modèle et la réalisation par l'enfant (0, 2, 4 et 6 secondes) et de l'âge des sujets (4, 5 et 6 ans). Les barres représentent l'erreur standard.

De la même façon que ce qui a été observé pour l'empan moyen, la pente de régression linéaire était assez similaire dans chacun des trois groupes d'âge (-.09 à 4 ans, -.08 à 5 ans et -.10 à 6 ans), $F < 1$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D) > .98$, alors que l'ordonnée à l'origine différait largement en fonction de l'âge (1.36, 2.18 et 2.70 à 4, 5 et 6 ans respectivement), $F(2,93) = 53.02$, $p < .0001$, $\eta^2 = .53$. Pour illustrer ces résultats, les droites de régression ont été incluses dans la figure 2.7.

L'analyse portant sur l'empan corrigé confirme donc celle menée sur l'empan moyen. L'empan augmente avec l'âge, mais chaque groupe d'âge est affecté de manière similaire par le délai de rétention.

Les types d'erreurs

Afin de compléter l'analyse sur les performances de rappel, les erreurs produites par les enfants dans la reproduction des séries ont été analysées en fonction de leur nature. Quatre types d'erreurs pouvaient être distingués. Le premier et le second types d'erreurs consistaient respectivement à placer plus de fruits dans le sac qu'il n'y en avait dans le modèle (i.e., surproduction) ou au contraire à en placer moins qu'il n'y en avait dans le

modèle (i.e., omissions). Les troisième et quatrième types d'erreurs intervenaient lorsque les enfants plaçaient le bon nombre de fruits dans le sac mais sans respecter l'ordre d'introduction des fruits (i.e., erreurs d'ordre) ou en introduisant un ou plusieurs fruit(s) non présent(s) initialement dans la séquence (i.e., erreurs d'identité). Chacun des essais erronés a été comptabilisé dans un seul type d'erreur. Pour effectuer des comparaisons des erreurs selon leur type, le nombre d'erreurs de chaque type a été calculé et divisé par le nombre total d'essais réalisés en fonction de l'âge (soit 12 essais à 4 ans, 16 essais à 5 ans et 20 essais à 6 ans), pour chaque enfant et au sein de chaque condition de rappel (Tableau 7.1)

Tableau 7.1. Proportions d'erreurs en fonction du type d'erreurs (surproduction, omission, ordre, identité) et de l'âge des sujets (4, 5 et 6 ans). Les écarts-types sont indiqués entre parenthèses.

Type d'erreurs	Surproduction				Omission				Ordre				Identité				
	Délai	0	2	4	6	0	2	4	6	0	2	4	6	0	2	4	6
4 ans	.01	.02	.05	.06	.02	.05	.05	.06	.24	.27	.27	.31	.05	.07	.06	.09	
	(.03)	(.04)	(.09)	(.11)	(.04)	(.10)	(.07)	(.07)	(.11)	(.12)	(.11)	(.10)	(.08)	(.10)	(.07)	(.10)	
5 ans	.01	.03	.02	.03	.07	.09	.09	.08	.24	.21	.25	.28	.04	.06	.10	.08	
	(.04)	(.05)	(.06)	(.05)	(.11)	(.10)	(.10)	(.10)	(.10)	(.10)	(.11)	(.12)	(.05)	(.07)	(.09)	(.06)	
6 ans	.01	.02	.02	.03	.11	.13	.13	.12	.22	.21	.24	.27	.07	.09	.08	.11	
	(.03)	(.03)	(.04)	(.06)	(.10)	(.12)	(.11)	(.11)	(.09)	(.09)	(.12)	(.09)	(.07)	(.06)	(.05)	(.08)	

Une ANOVA a été conduite sur ces proportions avec le type d'erreurs (i.e., surproduction, omission, ordre et identité) et le délai entre la présentation et la réalisation par l'enfant (i.e., 0, 2, 4 et 6 secondes) comme facteurs intra-sujet, et l'âge comme facteur inter-sujets (Tableau 2.3). Les erreurs de surproduction (.03) étaient moins fréquentes que les erreurs d'omissions (.08) et d'identité (.07), les erreurs d'ordre (.25) étant les plus fréquentes, $F(3,279)=267.84$, $p<.0001$, $\eta^2=.74$. Les analyses a posteriori confirment que les proportions des différents types d'erreurs diffèrent deux à deux, $p<.0001$, hormis celles des erreurs d'omissions et d'identité, $p=.29$. La proportion moyenne d'erreurs variait avec le délai, $F(3,279)=37.42$, $p<.0001$, $\eta^2=.29$, les erreurs étant de plus en plus nombreuses avec l'accroissement du délai de rétention, $ps<.004$. Cependant, le délai n'influa pas sur le pattern de production d'erreurs, l'interaction entre délai et type d'erreurs n'étant pas significatif, $F(9, 837)=1.71$, $p=.08$, $\eta^2=.02$, $p_{BIC}(H_0|D)>.99$. De la même façon, le délai a eu un impact similaire au travers des âges, l'interaction entre le délai et l'âge n'étant pas significative, $F(6,279)=1.77$, $p=.28$, $\eta^2=.03$, $p_{BIC}(H_0|D)>.99$. La proportion moyenne d'erreurs ne variait pas avec l'âge, $F(2,93)=1.29$, $p=.11$, $\eta^2=.04$, $p_{BIC}(H_0|D)>.96$ mais le pattern du type

d'erreurs, lui, n'était pas le même au travers des groupes d'âges, $F(6, 279)=5.65$, $p<.0001$, $\eta^2=.11$. Alors qu'aucune différence entre les âges n'a émergé au sein des surproductions, $p=.09$, des erreurs d'identité, $p=.23$, et des erreurs d'ordre, $p=.12$, les erreurs d'omissions devenaient plus fréquentes avec l'âge (.06, .08 et .12 à 4, 5 et 6 ans respectivement), probablement parce que les séries à traiter étaient de plus en plus longues, $F(2, 93) = 8.79$, $p<.003$, $\eta^2=.16$. Enfin, l'interaction entre l'âge, le délai et le type d'erreur n'était pas significative, $F<1$.

Ainsi, ces résultats révèlent la prévalence des erreurs d'ordre dans tous les âges. D'autre part, ils confirment l'effet délétère du temps sur les traces mémorielles puisque les erreurs augmentent, quel que soit leur type, au cours du temps et de façon similaire au travers des âges. Ainsi, afin d'aller plus avant dans l'analyse, les performances des enfants dans les essais de longueur correcte ont été recalculées, cette fois sans tenir compte de l'ordre d'introduction des fruits dans le sac.

Empan en mémoire sans tenir compte de l'ordre

Pour cette variable dépendante, l'empan des enfants a été recalculé en ne tenant compte que de l'identité des fruits à placer dans le sac. Ainsi, une séquence « Tomate-Raisin-Citron » produite pour le modèle « Tomate-Citron-Raisin » valait un quart de point puisque la série produite était de longueur correcte et contenait bien les items présents dans la séquence modèle. Une ANOVA a été conduite sur ce nouvel empan en mémoire avec le délai (0, 2, 4 et 6 secondes) comme facteur intra-sujet et l'âge (4, 5 et 6 ans) comme facteur inter-sujet. Conformément à ce qui avait été observé pour l'empan moyen en tenant compte de l'ordre, les performances de rappel augmentaient avec l'âge (2.63, 3.29 et 3.82 à 4, 5 et 6 ans respectivement), $F(2,93)=50.85$, $p<.0001$, $\eta^2=.52$. En outre, les performances diminuaient significativement au fil du temps, $F(3,279)=5.86$, $p<.0007$, $\eta^2=.06$, cette perte d'information étant similaire dans les trois groupes d'âges, $F<1$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.99$ (voir Figure 7.4).

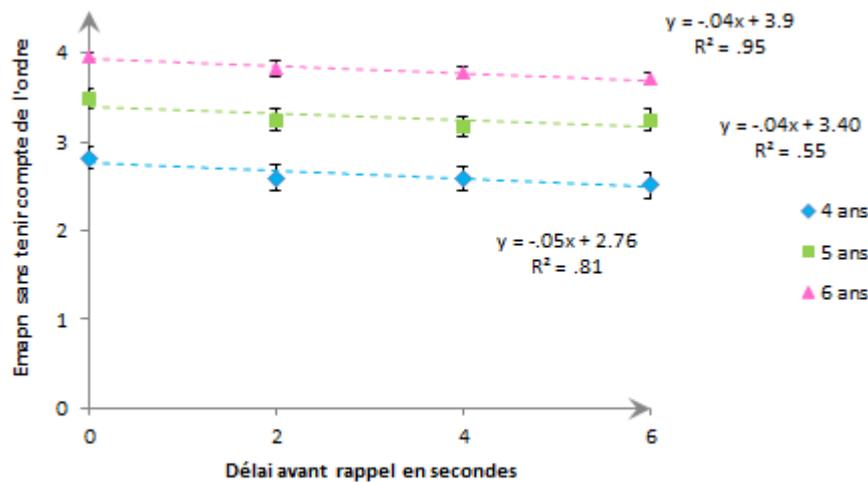


Figure 7.4. Empan moyen sans tenir compte de l'ordre en fonction du délai entre la présentation du modèle et la réalisation par l'enfant (0, 2, 4 et 6 secondes) et l'âge (4, 5 et 6 ans). Les barres représentent l'erreur standard.

Comme précédemment, l'analyse des pentes individuelles de régression a montré que l'âge n'avait pas d'impact sur la vitesse de déclin (-.05 à 4 ans, -.04 à 5 et 6 ans), $F < 1$, $p_{\text{BIC}(H_0|D)} > 0.98$. Néanmoins, on peut noter que ces pentes de déclin étaient plus modérées que celles observées lorsque l'ordre était pris en considération. Enfin, les trois groupes d'âge différaient par les valeurs de leur ordonnée à l'origine (2.76, 3.40, et 3.94 à 4, 5 et 6 ans respectivement), $F(2,93) = 44.96$, $p < .0001$, $\eta^2 = .49$. Les droites de régression linéaires ont été introduites dans la Figure 7.4 pour illustrer ces propos. Les résultats sur l'empan sans tenir compte de l'ordre ont donc confirmé, là encore, ceux obtenus précédemment, i.e. une augmentation de l'empan avec l'âge et un déclin temporel de même intensité au travers des âges. Mais une autre possibilité pour examiner les performances de rappel sans tenir compte de l'ordre était de considérer les seuls essais où les sujets n'avaient pas à maintenir l'ordre, c'est-à-dire les essais à 1 fruit.

Performances de rappel dans les essais à 1 fruit

Dans ces essais, les enfants avaient à choisir un seul fruit dans la boîte. Ce type de tâche n'est pas sans rappeler celles utilisées avec les nourrissons ou les très jeunes enfants pour évaluer la durée de rétention d'une information (emplacement d'un jouet par exemple) dans une tâche de rappel différé. Cependant, la performance de rappel des enfants de 4 à 6

ans est bien entendu élevée dans ce type de tâche, les enfants plus âgés ayant des performances quasi parfaites, même après un délai de rétention de 6 secondes, alors que les plus jeunes ont fait davantage d'erreurs. Le nombre d'erreurs, i.e. quand un enfant choisissait un fruit autre que celui du modèle, a donc été calculé pour chaque condition expérimentale de rappel (Tableau 7.2).

Tableau 7.2. Nombre total d'erreurs dans les essais à 1 fruit (sur 128 essais) en fonction du délai de rétention (0, 2, 4 et 6 secondes) et de l'âge (4, 5 et 6 ans).

	0 sec	2 sec	4 sec	6 sec
4 ans	6	6	13	16
5 ans	1	1	1	7
6 ans	0	0	1	1

Une ANOVA effectuée sur le nombre d'erreurs faites dans les essais à un fruit confirmait les résultats précédents avec des effets significatifs de l'âge et du délai, $F(2, 93)=15.57$, $p<.0001$, $\eta^2 =.25$, et $F(3,279)=4.77$, $p=.003$, $\eta^2 =.05$ respectivement. Ainsi le nombre d'erreurs diminuait avec l'âge mais augmentait avec le délai. L'interaction de ces deux facteurs n'était pas significative, $F(6,279)=1.42$, $p=.21$, $\eta^2=.03$, $pBIC(H_0|D)>.99$. Ainsi, comme observé chez les nourrissons et les très jeunes enfants, la représentation en mémoire d'un objet unique était sensible au délai de rétention chez le jeune enfant. Bien sûr, il ne faut pas oublier que les enfants n'avaient pas à disposition le même nombre de fruits dans la boîte (3 fruits à 4 ans, 4 à 5 ans et 5 à 6 ans). Afin de tenir compte de ce rapport à la chance différent selon les âges, une ANOVA similaire a été conduite sur un score corrigé, calculé ainsi $(p_C - p_R) / (1 - p_R)$, où p_C est le score réel en proportion et p_R la probabilité de faire le bon choix par chance. Cette analyse a mené à des conclusions tout à fait similaires, l'effet de l'âge et du délai étant tout deux significatifs, $F(2,93)=17.25$, $p<.0001$, $\eta^2 =.27$, et $F(3,279)=4.71$, $p=.003$, $\eta^2 =.05$ respectivement, alors que l'interaction ne l'était pas, $F(6, 279)=1.54$, $p=.17$, $\eta^2=.03$, $pBIC(H_0|D)>.99$.

Conclusion de l'étude 2

Le but de l'étude 2 était donc d'évaluer pour la première fois la vitesse de déclin de l'information en mémoire chez l'enfant entre 4 et 6 ans. Les résultats obtenus allaient dans le sens attendu et confirmaient une augmentation des performances avec l'âge entre 4 et 6 ans. Ainsi, l'empan augmentait environ de 1 item de 4 à 6 ans. Si l'on reste sur l'hypothèse d'une absence de mécanisme de maintien de l'information avant 7 ans, hypothèse qui est confortée par les résultats exposés dans le chapitre précédent, alors il en résulte qu'il existe une augmentation développementale du nombre d'informations pouvant être stockées en mémoire. En outre, les résultats mettaient l'accent sur deux points fondamentaux, i.e. l'effet délétère du temps sur les performances de rappel et une constance de la vitesse de l'oubli de l'information entre 4 et 6 ans.

Le premier point était donc une diminution des performances au cours du temps. Même dans le cas de la rétention d'un item unique, comme cela peut être observé chez les très jeunes enfants et les nourrissons, les traces mémorielles se dégradent au fil du temps engendrant davantage d'erreurs. Ce résultat est congruent avec les trois modèles de mémoire de travail présentés dans le chapitre 1, le modèle à Composantes multiples (Baddeley, 1986), le modèle des processus emboîtés (Cowan, 1999) et le modèle de partage temporel des ressources (Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004). En effet, ces 3 modèles postulent que les traces mémorielles déclinent avec le temps qui passe si rien n'est fait pour les réactiver comme les répéter via la boucle phonologique ou les rafraîchir via le focus attentionnel. Toutefois, ce résultat est aussi congruent avec l'hypothèse selon laquelle des interférences sont à l'origine de l'oubli de l'information en MDT, les interférences pouvant émerger durant le délai de rétention (Lewandowsky et al., 2009).

Le deuxième point était que la vitesse de déclin était similaire au cours du développement entre 4 et 6 ans puisqu'aucune des interactions entre l'âge et le délai n'était significative et que l'analyse des pentes de régression confirmait l'absence d'effet d'âge. Ainsi, les plus âgés et les plus jeunes oubliaient l'information à la même vitesse. Ces résultats rendent difficile l'explication de l'oubli avec le temps comme le résultat d'interférences survenant durant le délai. Toutefois, ils confirment que les enfants avant 7 ans n'utilisent pas spontanément de stratégie de maintien de l'information comme l'avait montré Camos et

Barrouillet (2011). Une analyse plus détaillée de ces deux points fondamentaux sera présentée dans la discussion générale à la fin du chapitre 7.

Expérience 3

Au-delà du rapprochement des deux courants de recherche visant pour l'un à étudier la durée de rétention de l'information en mémoire et pour l'autre à quantifier la capacité mémorielle, l'expérience rapportée ici voulait explorer la vitesse d'oubli de l'information chez des enfants plus jeunes. En effet, très peu d'études portent sur la capacité mémorielle des enfants avant 6 ans, mais encore moins avant 4 ans (Palmer, 2000 ; Mutter et al., 2006 pour le versant spatial ; Case et al., 1982 ; Ottem et al., 2007, pour le versant verbal), la seule étude évaluant des enfants aussi jeunes que 2 ans étant celle de Dempster (1981). L'objectif principal était donc d'évaluer, au travers d'une mesure de la capacité mémorielle, i.e. l'empan, le déclin des traces mémorielles avec le temps. Pour cela, il était nécessaire que la tâche soit accessible à des enfants si jeunes. De plus, les jeunes enfants avant 7 ans ne mettant pas en œuvre spontanément de mécanisme de maintien de l'information (Camos et Barrouillet, 2011), le deuxième objectif était d'examiner la vitesse de déclin de l'information au travers de l'étude des pentes de régression au travers du temps.

Ainsi, dans l'expérience 3, des enfants de 2 ans à 3 ans et demi ont reproduit des séquences de fruits pour « faire les courses comme maman » en introduisant des fruits en plastique dans un sac transparent à l'identique du modèle présenté par l'expérimentateur. Alors que pour l'expérience 2 nous avons fait le choix d'adapter le protocole au niveau développemental des sujets en proposant moins d'items différents aux petits (i.e. 3 fruits) qu'aux moyens (i.e. 4 fruits) et aux grands (i.e. 5 fruits), le choix a été fait dans cette expérience de proposer exactement la même procédure à tous les enfants. Ainsi, les enfants disposaient tous du même nombre de fruits dans la boîte, soit 4 fruits. Cependant, afin de réduire la durée de la tâche pour ces jeunes enfants dont les capacités d'attention sont très limitées, seules trois conditions de rappel ont été proposées contre 4 précédemment. Le sujet devait ainsi rappeler la séquence immédiatement, ou après un délai de 3 ou 5 secondes. Chaque sujet complétait 3 essais par longueur de fruits.

On s'attendait à ce que les performances diminuent avec le nombre de fruits à rappeler, et ce, à tous les âges, et que l'empan moyen augmente avec l'âge. De plus, du fait de l'absence de la mise en œuvre des mécanismes de maintien avant 7 ans, on s'attendait à

ce que les performances diminuent avec l'accroissement du délai de rétention.

METHODE

Participants

Cinquante-six enfants de 2 ans à 3 ans et demi ont participé à l'expérience 3. Ils ont été répartis en 3 groupes selon leur âge. Le premier groupe, nommé par la suite groupe des petits, comptait 19 enfants de 25 à 29 mois (âge moyen=27.03 mois, écart-type =1.24, 11 garçons). Le groupe des moyens comptait 19 enfants de 30 à 36 mois (âge moyen = 32.21, écart-type=1.64, 8 garçons) et le groupe des grands comptait 18 enfants de 36 à 42 mois (âge moyen = 39.08 mois, écart-type=1.42, 8 garçons). Tous les enfants étaient francophones et aucun n'était connu comme étant daltonien. Ils étaient issus de 3 lieux d'accueil de jour de la ville de Fribourg, en Suisse. L'accord des parents avait été sollicité au préalable.

Matériel et Procédure

La procédure et la passation expérimentale différaient peu de l'expérience 2. Les séquences proposées étaient de longueur croissante, soit de 1 à 4 fruits à introduire dans le sac, les enfants réalisant 3 essais par longueur de fruits. Les quatre fruits utilisés étaient citron, orange, pomme et tomate. Ils ont été choisis car ils étaient facilement identifiables de par leur couleur et leur familiarité chez ces jeunes enfants. L'enfant reproduisait la séquence de fruits, immédiatement ou après un délai de 3 ou 5 secondes. Durant le délai, l'enfant devait attendre l'ouverture de « l'épicerie ». On peut noter que cette fois, afin de ne pas inciter ou faciliter l'utilisation de codes verbaux, le nom des fruits n'étaient pas indiqué au moment de l'introduction des fruits dans le sac, l'expérimentateur restant silencieux.

Les sujets ont effectué les trois conditions expérimentales de rappel en trois sessions, sur 3 jours différents, la première et la dernière à environ 1 semaine d'intervalle. L'ordre de présentation des conditions de rappel a été contrebalancé, donnant lieu à 6 ordres de passation différents, répartis au hasard parmi les sujets de chacun des 3 groupes d'âges.

RESULTATS

L'analyse a débuté par l'étude des résultats concernant l'empan en mémoire au travers du groupe d'âge (2-2;6 ans ; 2;6-3 ans et 3-3;6 ans) et du délai (immédiat, 3 secondes et 5 secondes). Après avoir analysé la rétention combinée de l'identité et de l'ordre des fruits au travers de la mesure d'empan, l'analyse s'est poursuivie en observant la rétention de l'emplacement des fruits d'une part et la rétention des items sans tenir compte de leur ordre d'autre part. Ainsi, une analyse a porté sur l'étude de l'effet du délai (i.e., Immédiat, 3 secondes, 5 secondes), du groupe d'âge (petits, moyens, grands) et du nombre de fruits (1, 2, 3 et 4) sur le pourcentage de fruits rappelés dans une position conforme au modèle. Ensuite, les erreurs produites dans les essais à 1 fruit, seuls essais dans lesquels l'ordre n'intervient pas, ont été comptabilisées et analysées au travers de l'âge et du délai.

Empan en mémoire

Un empan moyen en mémoire a été calculé pour chaque enfant et pour chaque condition expérimentale de rappel. La méthode utilisée était la même que dans les expériences 1 et 2. Cependant cette fois, du fait qu'il n'y avait que 3 essais par longueur de série, ce n'était plus un quart mais un tiers de point qui était attribué à chaque essai réussi (i.e., items et ordre corrects) et pour chaque condition expérimentale. Par exemple, le protocole comportant 3 essais à 1 fruit réussis ($3 \times 1/3$), 2 essais à 2 fruits réussis ($2 \times 1/3$), aucun essai réussi à 3 fruits (0) et un essai réussi à 4 fruits ($1/3$), permettait d'évaluer l'empan moyen de l'enfant à $3/3 + 2/3 + 1/3$, soit 2 items.

La tâche proposée était réalisable par les jeunes enfants, même aussi jeunes que 2 ans. En effet, dans les essais à 1 fruit, les performances étaient très élevées (i.e., de 88 à 100 % de réussite) même après 5 secondes de rétention (i.e., de 74 à 94% de réussite). De plus, tous les enfants ont réussi au moins un item à 2 fruits, presque la moitié des sujets ont réussi au moins un item à 3 fruits (i.e., 27 enfants, 7 petits, 9 moyens et 11 grands) et 17 enfants ont réussi au moins un item à 4 fruits (i.e., 17 enfants, 3 petits, 7 moyens et 7 grands). Cependant, on notait une grande variabilité interindividuelle, laquelle augmentait encore avec la difficulté de la tâche, c'est-à-dire avec le délai. Les barres d'erreur de la Figure 7.5

illustrent cette variabilité.

Une ANOVA a été conduite sur l'empan moyen avec l'âge comme facteur inter-sujet (2-2;6 ans ; 2;6-3 ans et 3-3;6 ans) et le délai (0, 3 et 5 secondes) comme facteur intra-sujet. Elle confirme une amélioration des performances de rappel avec l'âge, $F(2,53)=8.01$, $p=.001$, $\eta^2=.23$. Les performances des plus jeunes (1.10) étaient inférieures à celles des moyens (1.37) et des grands (1.49), $ps<.007$. Cependant, les performances des grands n'étaient pas plus élevées que celles des moyens, $p=.25$. Les performances des plus jeunes étant toutefois faibles, une analyse supplémentaire a permis de vérifier qu'elles s'éloignaient du seuil du hasard, $F(1,18)=76.52$, $p=.0001$, $\eta^2=.81$.

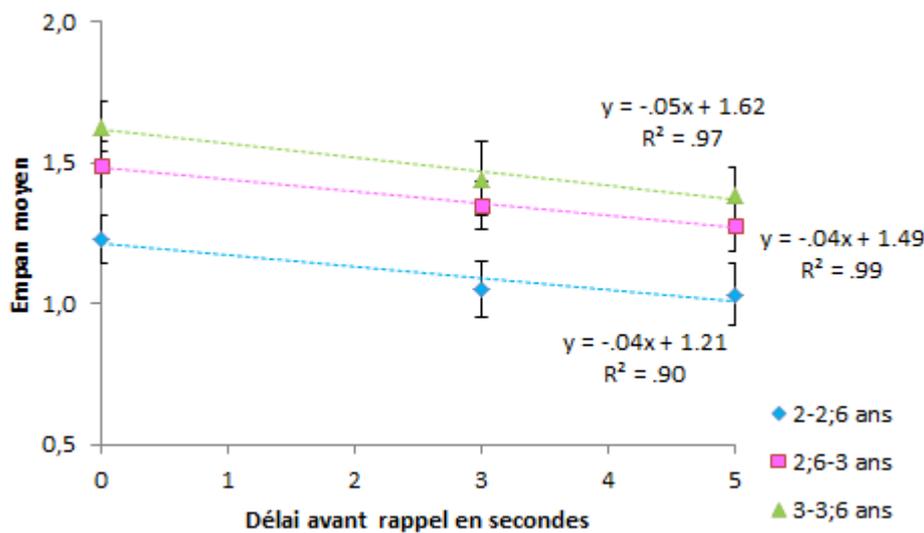


Figure 7.5. Empan moyen en fonction du délai avant le rappel en secondes (0, 3 et 5 secondes) et de l'âge des sujets (2-2,6 ans ; 2,6-3 ans et 3-3,6 ans). Les barres correspondent aux erreurs standards.

L'ANOVA confirmait aussi une détérioration des performances de rappel avec l'accroissement du délai de rétention, $F(2,106)=5.49$, $p=.006$, $\eta^2=.09$. Le rappel immédiat donnait lieu à un meilleur rappel (1.45) que les rappels différés de 3 (1.28) et 5 secondes (1.23), $ps<.02$. Les rappels différés quant à eux ne voyaient pas de différence dans les performances de rappel ce qui pourrait indiquer qu'au-delà d'un certain laps de temps, on parvient à un effet plancher, $F<1$. L'effet du délai était similaire dans les trois groupes d'âges, l'interaction entre l'âge et le délai n'étant pas significative, $F<1$, $p_{BIC}(H_0|D)>.99$, (Masson, 2011; Wagenmakers, 2007).

De la même manière que dans l'expérience 2, les pentes de régression linéaire ont

été calculées pour chaque enfant et utilisées comme variable dépendante dans une ANOVA avec l'âge comme facteur inter-sujet. La valeur de la pente moyenne était très similaire dans les trois groupes d'âges (-.04 de 2 ans à 3 ans, -.05 de 3 ans à 3 ans et demi), $F < 1$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D) > .98$. De la même manière, les valeurs de l'ordonnée à l'origine ont été calculées pour chaque enfant. Au contraire des résultats obtenus à partir des pentes de régression, les trois groupes d'âge différaient quant aux valeurs d'interception des droites avec l'origine, ces valeurs augmentant avec l'âge (1.24, 1.49 et 1.62 pour le groupe des petits, des moyens et des grands respectivement), $F(2,53)=6.65$, $p < .003$, $\eta^2 = .20$.

Ces dernières analyses confirmaient donc les résultats précédents. L'empan augmentait avec l'âge mais les enfants étaient affectés de la même manière par le délai imposé entre présentation du modèle et réalisation de la tâche, et ce quel que soit l'âge, entre 2 ans et 3 ans et demi. Pour illustrer cette tendance, les droites de régression ont été incluses dans la Figure 7.5. Ce dernier résultat concorde avec ce qui avait été observé d'ailleurs chez les enfants entre 4 et 6 ans, même si l'on remarque que les pentes sont ici moins élevées.

Afin d'analyser plus finement les résultats, les empan étant très faibles chez des enfants aussi jeunes, l'analyse a été poursuivie selon deux axes : l'analyse des performances dans le rappel de la position des fruits, indépendamment de la mesure d'empan d'une part et le rappel de l'identité des items sans tenir compte de l'ordre d'autre part. Tout d'abord, le nombre de fruits replacés dans une position conforme au modèle a été comptabilisé et transformé en proportion pour analyser le rappel selon la place des items et ce, indépendamment de l'empan. Ensuite, les performances des essais où l'ordre ne rentre pas en ligne de compte, les essais à 1 seul fruit, ont été analysées en fonction de l'âge et du délai.

Proportion de fruits rappelés dans une position conforme au modèle

Pour le calcul de cette variable, le nombre d'items placés dans une position conforme au modèle était comptabilisé. Ainsi, la réalisation de « Banane-Tomate-Raisin » pour le modèle « Banane-Raisin-Orange » attribuait un point pour la bonne place attribuée à l'item

banane. Ensuite, pour chaque quantité de fruits, chaque condition expérimentale et chaque âge, le nombre d'items rappelés dans une position conforme au modèle était transformé en proportion d'items bien replacés. Une ANOVA a été conduite sur la proportion de fruits correctement replacés avec l'âge (2 ans à 2 ans et demi, 2 ans et demi à 3 ans, et 3 ans à 3 ans et demi) comme facteur inter-sujet, le nombre de fruits à rappeler (1, 2, 3 ou 4) et le délai (0, 3 et 5 secondes) comme facteurs intra-sujets. Elle révélait que la proportion d'items replacés dans une position conforme au modèle augmentait avec l'âge, $F(2,53)=6.91$, $p<.003$, $\eta^2 =.21$. Les petits rappelaient significativement moins d'items dans une position conforme au modèle (.41) que les moyens (.47) et les grands (.51), les performances des moyens et des grands ne différant cependant pas significativement, $ps<.04$ et $p=.14$ respectivement.

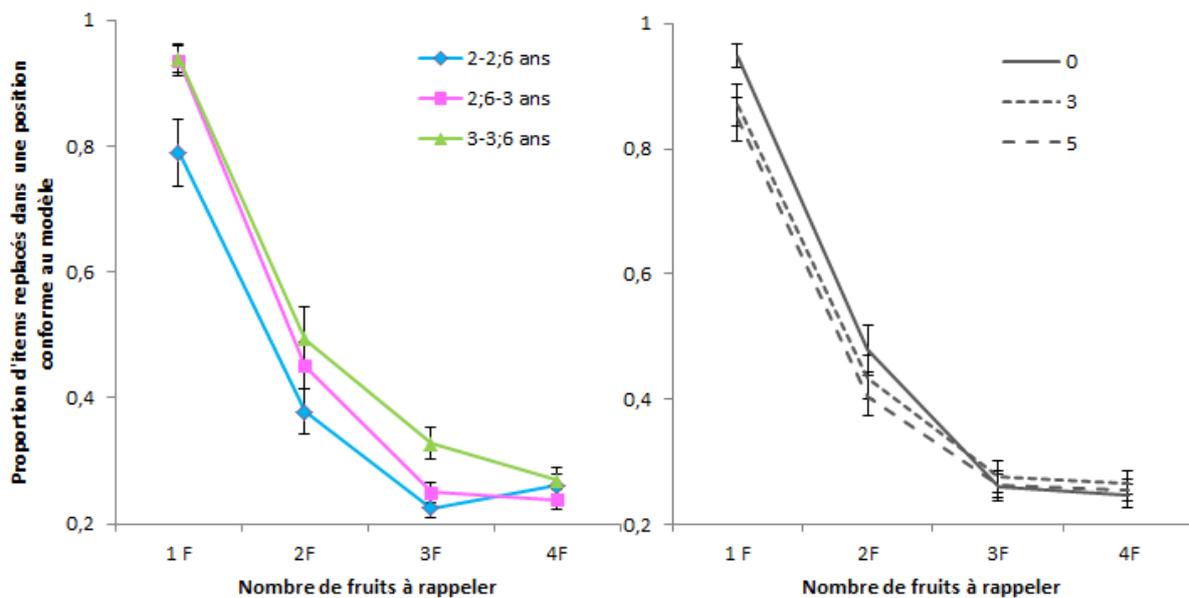


Figure 7.6. Proportion d'items rappelés dans une position conforme au modèle en fonction du nombre de fruits à rappeler (1, 2, 3 ou 4) et de l'âge (2 à 2 ans et demi, 2 ans et demi à 3 ans, 3 ans à 3 ans et demi). Les barres correspondent aux erreurs standards.

D'autre part, les performances diminuaient avec le nombre de fruits à rappeler, $F(3,159)=318.97$, $p<.0001$, $\eta^2 =.86$. L'effet du nombre de fruit était similaire au travers des âges car, même si l'interaction entre les deux facteurs tendait à être significative, le critère d'information bayésien confirmait une très forte probabilité que l'hypothèse nulle soit vérifiée, $F(6,159)=2$, $p=.07$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D) > .99$. Toutefois, la Figure 7.6 suggérait un écart très net entre les performances à 1 et 2 fruits d'une part et 3 et 4 fruits d'autre part. Les analyses

a priori ont effectivement montré que les proportions de rappel correct dans les essais à 1 et 2 fruits différaient significativement l'une de l'autre et étaient supérieures aux proportions des essais à 3 et 4 fruits, $p < .0001$. Par contre, les proportions de rappel des essais à 3 et 4 fruits ne différaient pas significativement entre elles, $p = .46$. Etant donné les faibles performances des enfants dans la restitution de la place des fruits dans les essais à 3 et 4 fruits (i.e. .27 et .26 de réussite respectivement), est apparue alors la question de savoir si les performances obtenues par les enfants différaient du seuil du hasard. La proportion moyenne d'items bien placés par hasard a donc été calculée pour les longueurs 3 et 4 fruits. Ainsi, pour 3 fruits, l'enfant avait une chance sur 4 de choisir chacun des fruits puisque il existe 4 arrangements possibles pour chaque fruit et à chaque position avec un corpus de 4 items, soit $(1/4 + 1/4 + 1/4)$ pour chaque essai, soit $3/4 * 3$ pour les 3 essais. La proportion moyenne était alors de $9/4$ divisé par les 9 items à restituer, soit une proportion de .25. La même valeur était obtenue par un procédé identique pour les essais à 4 fruits. Une fois le seuil du hasard déterminé, les proportions obtenues dans les essais avec 3 et 4 fruits lui ont été comparées. Finalement, il s'est avéré que les proportions obtenues par les petits et les moyens dans les essais à 3 et 4 fruits ne différaient pas du seuil du hasard, $p > .19$. Trois fruits est donc au-delà de la capacité mémorielle des enfants de 2 ans à 3 ans. De même, les proportions des grands dans les essais à 4 fruits ne différaient pas du seuil du hasard, alors que leurs performances dans les essais à 3 fruits lui étaient supérieures, $F < 1$ et $p < .0003$ respectivement. Ainsi, si 4 items à rappeler est au-delà des capacités mémorielles des enfants à partir de 3 ans, ces mêmes enfants peuvent traiter jusqu'à 3 items alors même que les plus jeunes en sont incapables.

D'autre part, l'ANOVA révélait aussi que l'impact du délai sur la proportion de fruits rappelés dans une position conforme au modèle n'était pas statistiquement significatif, mais qu'il tendait à l'être, $F(2,106) = 2.95$, $p = .06$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D) > 0.64$. La probabilité du critère d'information bayésien étant compris entre .50 et .75, la preuve de la véracité de l'hypothèse nulle est faible (Masson, 2011). D'autre part, l'effet du délai sur la proportion d'items correctement replacés était le même au travers des âges, en fonction du nombre de fruits, mais aussi au travers de l'âge et du nombre de fruits, aucune interaction n'étant significative, $p > .18$. Pour comprendre pourquoi l'effet simple du délai n'était pas significatif, des ANOVAS ont été conduites sur les essais à 1 et 2 fruits d'une part et à 3 et 4 fruits

d'autre part, les données évoquant un impact du délai différent entre 2 et 3 fruits (Figure 7.6). En effet, les essais à 1 et 2 fruits voyaient un impact du délai alors que les performances dans les essais à 3 et 4 fruits ne différaient pas au travers du temps, $F(2,106)=7.89$, $p<.001$, $\eta^2 =.13$ et $F<1$ respectivement. Comme il a été dit précédemment, les performances des enfants à 3 et 4 fruits ne différaient pas du hasard, hormis celles des grands pour les essais à 3 fruits, le délai n'avait pas d'impact sur les performances des essais à 3 et 4 fruits car c'est au-delà de la capacité mémorielle des enfants de cet âge. Ainsi, on observe là encore une augmentation des performances avec l'âge ainsi qu'une diminution des performances au travers du temps, du moins lorsque l'on considère les essais où la capacité mémorielle des sujets n'est pas outrepassée, c'est-à-dire les essais à 1 et 2 fruits.

Les essais à 1 seul fruit

Comme dans les études chez les bébés et les très jeunes enfants, les essais à 1 fruit ne nécessitaient de ne maintenir en mémoire qu'un objet unique durant un intervalle de temps donné, sans intervention de l'ordre. Ainsi, les erreurs d'identité du fruit (i.e., un fruit pris à la place d'un autre) ont été comptabilisées afin d'observer l'effet du temps qui passe sur les erreurs commises. En rappel immédiat, les erreurs étaient moins fréquentes avec l'âge, le groupe plus âgé ayant des performances parfaites à 1 fruit en rappel immédiat (0 erreur, Tableau 7.3).

Tableau 7.3. Nombre d'erreurs commises dans les essais à 1 fruit en fonction de l'âge (i.e., 2 ans à 2 ans et demi, 2 ans et demi à 3 ans, 3 ans à 3 ans et demi) et du délai (i.e., 0, 3 ou 5 secondes) s'écoulant entre présentation du modèle et rappel.

	0 s	3 s	5 s
2 à 2 ans et demi	7	9	15
2 ans et demi à 3 ans	1	3	8
3 ans à 3 ans et demi	0	4	3

Le nombre d'erreurs a donc fait l'objet d'une ANOVA avec le délai (0, 3 et 5 secondes) comme facteur intra sujet et l'âge (2 à 2 ans et demi, 2 ans et demi à 3 ans, et 3 ans à 3 ans et demi) comme facteur inter-sujet. Il en ressort que le nombre d'erreurs diminuait avec

l'âge, mais augmentait avec le délai, $F(2,53)=4.88$, $p<.02$, $\eta^2 =.16$, et $F(2,106)=5.97$, $p<.004$, $\eta^2 =.10$ respectivement. L'impact du délai était le même selon l'âge, l'interaction entre l'âge et le délai n'étant pas significative, $F(4,106)=1.18$, $p=.32$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.99$. Comme pour les mesures d'empan, les performances des moyens et des grands ne différaient pas entre elles, mais ces deux groupes faisaient significativement moins d'erreurs que les petits, $p=.87$ et $p<.02$ respectivement. De plus, le nombre d'erreurs augmentait significativement de 0 à 3 secondes, alors qu'il ne variait plus significativement de 3 à 5 secondes, $p<.02$ et $p=.53$ respectivement. L'analyse des essais à 1 fruit confirme celles réalisées auparavant : les performances augmentent avec l'âge et diminuent avec le délai, l'impact du délai étant le même au travers des âges.

Conclusion de l'expérience 3

Le but de cette expérience était donc de tester la possibilité d'utiliser le paradigme de la marchande chez des enfants très jeunes afin d'observer le déclin de l'information en mémoire au cours du temps. Le premier résultat que l'on peut rapporter est que ce paradigme est utilisable avec des enfants aussi jeunes que 2 ans. En effet, aucun enfant n'a été éliminé de l'étude pour ne pas avoir compris la tâche et les performances dans les essais à un fruit étaient élevées dans chacun des groupes d'âges étudiés. Tous les enfants ont réussi au moins un item à deux fruits et le paradigme s'est révélé suffisamment sensible pour mettre en évidence l'augmentation des performances de rappel avec l'âge. De plus, deux résultats principaux, en accord avec nos hypothèses, ont émergé. Premièrement, les performances ont décliné au cours du temps et deuxièmement, le déclin était similaire entre les 3 groupes d'âges.

Ainsi, que ce soient les performances de rappel de la nature de l'item (i.e., rappel du fruit dans les essais à un fruit), de la place d'un item dans la série (i.e., pourcentage de fruits rappelés dans une position conforme au modèle) ou d'une combinaison des deux informations (i.e., empan), les résultats vont dans le sens de l'amélioration des performances avec l'âge. Ce résultat est d'ailleurs confirmé par l'accroissement des valeurs de l'ordonnée à l'origine. Les enfants de 3 ans et demi rappellent en moyenne presque un demi-item supplémentaire que les plus jeunes de 2 ans. Toutefois, on notera que la

performance de rappel des moyens, évaluée au travers de l'empan, ne diffère pas significativement de celle des grands. Ce résultat peut trouver deux explications. Tout d'abord, il est possible que notre paradigme, incluant trois essais par longueur de fruits, ne soit pas suffisamment sensible pour déceler les différences de performances entre les enfants dont l'âge est compris entre 2 ans et demi et 3 ans, de ceux dont l'âge est compris entre 3 ans et 3 ans et demi. L'autre explication à cette absence de différence significative dans les performances de rappel pourrait être que l'on soit en présence d'un groupe de moyens qui aient, par hasard un niveau un peu supérieur à la moyenne de son groupe d'âge, ou un groupe de grands qui aient, par hasard, un niveau un peu inférieur à la moyenne de son groupe d'âge, les deux hypothèses ne s'excluant pas mutuellement.

Ensuite, les différentes variables dépendantes observées ont aussi confirmé l'effet délétère du temps sur les performances de rappel. Ce résultat est en accord avec ce qui a été observé lors des deux précédentes expériences, mais aussi avec les principaux modèles de mémoire de travail qui suggèrent une diminution du niveau d'activation des traces mémorielles au cours du temps (Baddeley, 1986 ; Barrouillet et al., 2004, Cowan, 1995). Ces résultats peuvent aussi s'interpréter par l'hypothèse de la dégradation des traces mémorielles en MCT par interférences de représentations émergeant durant le délai de rétention (Lewandowsky et al., 2009). De plus, la vitesse d'oubli en mémoire était similaire entre 2 et 3 ans et demi puisqu'aucun effet d'interaction entre l'âge et le délai ne s'est révélé significatif et que l'analyse n'a pas montré d'effet d'âge sur les pentes de régression. Ce résultat confirme, là encore, ceux obtenus précédemment. Toutefois, les pentes observées étaient plus faibles que dans l'expérience 2 et la perte d'information était plus faible entre les deux rappels différés (i.e., perte de .05 item) qu'entre le rappel immédiat et le rappel différé de 3 secondes (i.e., perte de .17 item). Il est possible qu'au-delà de 3 secondes de rétention, la plus grande partie de l'information pouvant être oubliée le soit par les enfants entre 2 et 3 ans et demi révélant ainsi un effet plancher.

Les résultats de l'expérience 3 se verront discutés plus longuement et mis en perspective avec les résultats des deux autres études dans la discussion générale du chapitre 7, au sein de la partie expérimentale.

Expérience 4

De même que les expériences 2 et 3, l'expérience 4 proposait de se faire rejoindre les deux courants de recherche de l'étude de la mémoire, mais au travers d'un autre paradigme original « la course de ski des poupées ». Ce paradigme permettait, à l'identique du paradigme de la marchande, d'évaluer la capacité mémorielle des sujets par le calcul d'un empan à travers une procédure d'augmentation progressive de un en un du nombre d'items à mémoriser. En outre, ce paradigme permettait aussi d'évaluer le déclin temporel de l'information par la manipulation du délai entre la présentation du modèle et la réalisation de la tâche par l'enfant. Ce paradigme original mettait en jeu des petites poupées en bois colorées et décorées dont la caractéristique principale était de ne pouvoir être nommées, contrairement aux stimuli précédents, les fruits. Ces poupées se distinguaient par la couleur de leur habit, la forme de leurs cheveux, l'expression de leur visage et les décorations portées, mais aucune ne portait de nom spécifique. L'introduction de ce nouveau paradigme avait pour but de conforter les résultats des études précédentes par leur réplique, au travers de stimuli nouveaux ne facilitant pas l'utilisation de codes verbaux, et d'observer le déclin temporel de l'information au travers de délais plus longs que précédemment.

Ainsi, dans l'expérience 4, des enfants de 4 ans à 6 ans ont reproduit des séquences pour faire « la course des poupées » en alignant des poupées en bois derrière la ligne d'arrivée, à l'identique du modèle réalisé par l'expérimentateur. A l'identique de l'expérience 3, les enfants disposaient tous du même nombre de poupées à concourir mais le nombre de stimuli proposés étaient augmenté, soit 6 poupées au total. Toutefois, pour que la tâche ne devienne pas inaccessible aux enfants, les séries à rappeler n'excédaient pas 5 items. Le rappel intervenait immédiatement ou après un délai de 4, 8 ou 12 secondes. Les 4 conditions expérimentales de rappel étaient présentées à tous les sujets, en deux sessions. Cependant, afin que la passation de chaque session ne soit pas trop longue, les sujets ont complété 2 essais seulement par longueur de courses. On s'attendait à ce que l'empan augmente avec l'âge mais qu'il diminue avec le temps. D'autre part, on s'attendait à ce que, à l'identique des deux expériences précédentes, les performances déclinent de la même façon au travers des âges, c'est-à-dire que l'interaction entre ces deux facteurs n'atteigne pas la significativité.

METHODE

Participants

Quatre-vingt-quatre enfants de maternelle de 4 ans (28 enfants, âge moyen= 3 ans 6 mois, étendue de 3 ans à 3 ans 11 mois, 10 garçons), 5 ans (28 enfants, âge moyen = 4 ans et 6 mois, étendue de 4 ans à 4 ans 11 mois, 15 garçons) et 6 ans (28 enfants, âge moyen = 5 ans et 6 mois, étendue de 5 ans à 5 ans et 11 mois, 13 garçons) ont participé à l'étude 4. Tous les enfants étaient francophones et aucun n'était connu comme étant daltonien. Ils étaient issus de deux écoles maternelles de milieu rural en Bourgogne. L'accord des parents avait été sollicité au préalable.

Matériel et Procédure

L'expérimentateur et l'enfant étaient installés face à un dispositif en bois représentant des pistes de ski (Figure 7.7). Ces pistes étaient suffisamment étroites pour obliger l'enfant à placer les poupées les unes derrière les autres, indiquant ainsi clairement l'ordre d'arrivée de la course.



Figure 7.7. Dispositif comprenant les deux pistes de skis, les poupées en bois et le dispositif électronique.

Six petites poupées en bois équipées de ski étaient disposées devant l'enfant au pied de la piste prévue pour la réalisation de la course. Les six poupées étaient de couleurs différentes (vert, blanc, rose, noir, violet, jaune) et différaient par les ornements de leurs

kimonos (manches arrondies vs carrées), l'expression de leur visage (yeux rieurs vs yeux baissés), leur coiffure (en chignon vs coupe en carré), et les décorations présentes dans leurs cheveux (ruban, strass, perles, autocollants ; Figure 7.8). Ces poupées avaient la spécificité de ne pas avoir de nom propre, et l'expérimentateur était attentif à ne jamais les nommer par une de leur caractéristique afin de ne pas encourager ou faciliter l'utilisation de codes verbaux par les enfants. De plus, afin de ne pas avoir de séries utilisant tous les items (et que les enfants utilisent cet indice dans leur rappel) le nombre de poupées était de 6, alors que les séquences les plus longues à mémoriser étaient de 5 items. Ainsi, au moment de choisir les poupées pour réaliser les courses, les enfants étaient toujours confrontés au choix parmi les poupées cibles et des poupées interférentes et ce, même dans les essais les plus longs proposés (i.e. 5 items) où une poupée était toujours inutile.



Figure 7.8 Jeu des six poupées.

La passation commençait lorsque l'expérimentateur prenait une poupée et lui faisait descendre la piste de ski avec un petit son de glissement pour maintenir l'attention de l'enfant, celui-ci regardant la scène. L'expérimentateur faisait ainsi descendre l'une après l'autre les poupées prévues pour la course (i.e. de 1 à 5 poupées) et les plaçaient les unes derrière les autres pour montrer l'ordre d'arrivée (Figure 7.7). Après que la piste de ski de l'expérimentateur ait été cachée derrière un écran, l'enfant devait reproduire la course de ski des poupées et ce, en respectant l'ordre d'arrivée des poupées. Après deux essais avec une poupée, l'expérimentateur augmentait le nombre de poupées arrivant en bas de la piste, jusqu'à parvenir au nombre maximum de 5 poupées sur la ligne d'arrivée. La procédure comptait deux essais par longueur et chaque sujet devait accomplir chacune des 4 conditions expérimentales de rappel. Ainsi, l'enfant devait reproduire la course des poupées, soit immédiatement après que la piste de l'expérimentateur soit cachée, soit après un délai de 4, 8 ou 12 secondes. Pendant ce délai, l'enfant devait tout simplement attendre le signal de départ de la course, attente illustrée par l'allumage d'une diode rouge commandée par

un dispositif électronique. Celui-ci permettait de régler l'allumage d'une diode verte et l'émission d'un signal sonore indiquant tous deux le départ de la course, par le biais d'une minuterie (Figure 7.9).



Figure 7.9 Dispositif électronique, réglé via une minuterie, permettant d'illustrer l'attente avant le départ de la course (diode rouge) puis d'indiquer le départ de la course (allumage d'une diode verte et émission d'un signal sonore).

Les sujets ont effectué les quatre conditions expérimentales de rappel en deux sessions espacées d'environ une semaine. Chaque session comptait 2 conditions de rappel mais jamais les deux courtes ensemble (i.e., immédiat et 4 secondes de délai), ni les deux plus longues ensemble (i.e., 8 et 12 secondes de délai). Seize ordres de passation étaient donc possibles. Les sujets ont été affectés aléatoirement à un ordre de passation, chaque ordre comptant 1 à 2 sujets de chaque groupe d'âge. La première session expérimentale débutait par une discussion entre l'expérimentateur et l'enfant afin de présenter le jeu et de mettre l'enfant en confiance face à cette situation nouvelle. Lors de cette présentation, l'expérimentateur expliquait clairement à l'enfant qu'une course de ski étant difficile, tous les participants n'arrivent pas nécessairement en bas de la piste. Ensuite, la tâche était expliquée à l'aide de trois animaux en plastique (Figure 7.10).



Figure 7.10. Matériel utilisé pour expliquer la tâche.

Le modèle de l'expérimentateur restait visible pour le premier essai comptant 2 animaux, l'enfant ayant juste à le copier. Pour les autres essais, comptant eux aussi deux animaux, la piste de l'expérimentateur était dissimulée derrière un cache. L'entraînement durait jusqu'à ce que l'enfant réussisse la tâche au moins une fois avec un essai caché. Afin que les enfants se mobilisent au maximum pour réussir la tâche, il leur était annoncé qu'un bonbon leur serait donné s'ils réussissaient bien à faire la course des poupées.

RESULTATS

Tout d'abord, une analyse a été conduite sur les empan en mémoire obtenus par les sujets en fonction de leur âge et de la condition expérimentale de rappel. Puis, les erreurs commises par les sujets ont été identifiées et analysées. Enfin, du fait que la majorité des erreurs ont été commises dans l'identité des items à rappeler (i.e. dans le choix des poupées à utiliser pour faire la course), une première analyse a porté sur les essais dont l'identité seule de l'item importait, i.e. les essais comportant une seule poupée, puis une seconde analyse a été conduite sur la proportion d'items correctement restitués sans tenir compte de l'ordre.

Notons qu'un enfant de 4 ans a été écarté de l'analyse des résultats, ses performances se situant à 2 écarts-types en dessous de la moyenne des résultats de son groupe d'âge. D'autre part, l'effet d'ordre n'ayant jamais atteint la significativité, ce facteur a été exclu des analyses présentées ci-après, $p_s > .23$, $p_{\text{BIC}(H_0|D)} > .99$.

Empan en mémoire

Un empan moyen en mémoire a été calculé pour chaque enfant et pour chaque condition expérimentale de rappel, en employant la méthode citée pour les 3 expériences précédentes. Les sujets réalisant seulement 2 essais par longueur de série, un demi-point était attribué pour chaque séquence parfaitement reproduite (i.e. items et ordre des items).

Une analyse de variance (ANOVA) a été conduite sur l'empan moyen avec l'âge (4, 5 et 6 ans) comme facteur inter-sujet, et le délai avant rappel (0, 4, 8 et 12 secondes) comme

facteur intra-sujet. Les performances de rappel augmentaient avec l'âge, $F(2,80)=45.66$, $p<.0001$, $\eta^2=.53$ (Figure 7.11). Les enfants de quatre ans ont eu des performances inférieures (1.29) à celles des enfants de 5 ans ayant eux-mêmes des performances inférieures (1.59) à celles des enfants de 6 ans (2.20), les performances des groupes d'âges comparés deux à deux étant significativement différentes, $ps<.003$. D'autre part, l'augmentation du délai entre la présentation du modèle et la réalisation par l'enfant entraînait une diminution des performances de rappel, $F(3, 240)=12.65$, $p<.0001$, $\eta^2=.14$. Le rappel était ainsi le plus élevé en rappel immédiat (1.95), pour diminuer ensuite peu à peu avec le temps (1.75, 1.60 et 1.47 à 4, 8 et 12 secondes respectivement). Des comparaisons menées a priori révélaient ainsi des différences significatives entre les couples de rappel, $ps<.001$, hormis entre 4 et 8 secondes où la différence tendait à être significative et le critère bayésien était faible, $p=.07$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.61$, et entre 8 et 12 secondes, $p=.13$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.73$.

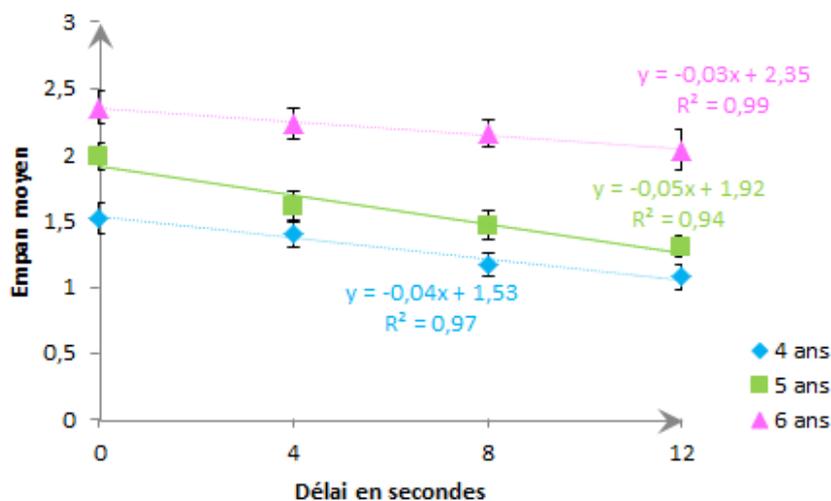


Figure 7.11 Empan moyen en fonction du délai en secondes (0, 4, 8 et 12) et de l'âge (4, 5 et 6 ans).

D'autre part, le déclin des performances était similaire au travers de l'âge, l'interaction entre ces deux facteurs n'étant pas significative, $F<1$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.99$. Pour compléter cette analyse, les pentes individuelles de régression ainsi que les ordonnées à l'origine ont été calculées pour chaque sujet et dans chaque condition de rappel. Conformément aux résultats précédents, les pentes de régression ne variaient pas avec l'âge, $F(2, 80)=1.36$, $p=.26$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.93$. A l'opposé, les ordonnées à l'origine augmentaient progressivement avec l'âge (1.53, 1.92, 2.36 à 4, 5 et 6 ans respectivement), $F(2, 80)=15.33$, $p<.0001$, $\eta^2=.28$. Ainsi, les performances de rappel augmentaient avec l'âge

mais étaient négativement impactées par le temps, et ce de manière similaire au travers du temps et des trois groupes d'âges, comme l'illustrent les droites de régression introduites dans la Figure 7.11 (de -.03 à -.05).

Les types d'erreur

Dans la reproduction de la séquence présentée, les erreurs produites par les sujets pouvaient être de deux ordres. Tout d'abord, les sujets pouvaient commettre une erreur dans la quotité d'items à rappeler (i.e. surproduction, omission). D'autre part, lorsque les essais réalisés comportaient un nombre correct de poupées sur la ligne d'arrivée, les sujets pouvaient commettre des erreurs sur l'identité des items utilisés (i.e. erreurs d'identité) ou sur l'ordre des items à l'intérieur de la séquence (i.e. erreur d'ordre). Chaque essai erroné n'était donc comptabilisé que dans un seul type d'erreur, le premier critère pris en compte étant le nombre de poupées replacées dans la séquence en fonction du modèle. Pour chaque sujet, le nombre d'erreurs de chaque type a été comptabilisé pour chaque condition expérimentale de rappel puis divisé par le nombre d'essais réalisés au sein de chaque condition expérimentale (i.e., 15 essais) pour être converti en proportion d'erreurs (Tableau 7.4).

Tableau 7.4. Proportion d'erreurs en fonction du type d'erreurs (Surproduction, Omission, Identité, ou Ordre), du délai avant rappel (0, 4, 8 ou 12 secondes) et de l'âge (4, 5 ou 6 ans). Les écarts-types sont indiqués entre parenthèses.

Type d'erreurs	Surproduction				Omission				Identité				Ordre				
	Délai	0	4	8	12	0	4	8	12	0	4	8	12	0	4	8	12
4 ans		.07	.06	.08	.12	.17	.19	.18	.16	.19	.19	.19	.18	.04	.05	.03	.04
		(.08)	(.08)	(.10)	(.12)	(.11)	(.13)	(.10)	(.12)	(.09)	(.09)	(.12)	(.09)	(.06)	(.05)	(.05)	(.06)
5 ans		.03	.04	.09	.06	.09	.13	.08	.10	.19	.21	.21	.25	.07	.08	.06	.07
		(.05)	(.08)	(.13)	(.10)	(.08)	(.11)	(.09)	(.10)	(.11)	(.10)	(.13)	(.13)	(.09)	(.07)	(.08)	(.07)
6 ans		.03	.02	.02	.05	.10	.10	.13	.09	.13	.16	.15	.17	.07	.07	.05	.06
		(.06)	(.07)	(.06)	(.09)	(.07)	(.11)	(.08)	(.09)	(.08)	(.10)	(.09)	(.10)	(.07)	(.06)	(.07)	(.06)

Une ANOVA a été conduite sur les proportions d'erreurs avec le type d'erreurs (i.e. Surproduction, Omission, Identité et Ordre) et le délai avant rappel (0, 4, 8 ou 12 secondes) comme facteurs intra-sujets, et l'âge (4, 5 ou 6 ans) comme facteur inter-sujet. La proportion d'erreurs diminuait avec l'âge, les enfants de 6 ans faisant moins d'erreurs (.09) que les

enfants de 5 ans (.11), faisant eux-mêmes moins d'erreurs que les enfants de 4 ans (.12), $F(2, 80)=48.78$, $p<.0001$, $\eta^2=.55$, $ps<.004$. D'autre part, la proportion d'erreur augmentait avec la durée du délai avant rappel, $F(3, 240)=7.55$, $p<.0001$, $\eta^2=.08$. On note toutefois que cet effet était surtout dû à la différence entre rappel immédiat (.06) et rappels différés (.12), $F(1, 80)=23.37$, $p<.0001$. En effet, chaque rappel différé (.11 à 4, 8 et 12 secondes) engendrait plus d'erreurs que le rappel immédiat (.06), $ps<.01$, les rappels différés ne différant pas entre eux, $ps>.23$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)s>.81$, hormis les conditions 8 et 12 secondes, $p<.04$. Enfin, les proportions d'erreurs différaient selon le type d'erreurs, $F(3, 240)=69.26$, $p<.0001$, $\eta^2=.46$. Ainsi, les erreurs d'identité (.19) étaient plus nombreuses, que les erreurs d'omissions (.13), étant elles-mêmes plus nombreuses que les autres types d'erreurs, $p<.0001$. Les erreurs de surproduction (.06) et d'ordre (.06) étaient les moins nombreuses et comptabilisées en proportions similaires, $p=.77$.

La proportion de chaque type d'erreur évoluait cependant différemment au travers des trois groupes d'âge, l'interaction entre ces deux facteurs étant significative, $F(6, 240)=4.82$, $p<.001$, $\eta^2=.11$. Ainsi, les erreurs sur la quotité des séries étaient plus nombreuses chez les enfants plus jeunes. A 4 ans, les erreurs d'omissions étaient plus nombreuses (.17) qu'à 5 et 6 ans (.10 et .11 respectivement), $ps<.001$. Les erreurs de surproductions étaient aussi plus nombreuses à 4 ans (.08) qu'à 6 ans (.03) et tendaient à être supérieures à celles comptabilisées chez les 5 ans (.06), $ps<.002$ et $p=.08$ respectivement. A l'opposé, les erreurs d'ordre étaient significativement moins nombreuses à 4 ans (.04) qu'à 5 et 6 ans (.07), $ps<.03$. Les erreurs d'identité étaient quant à elles plus nombreuses à 5 ans (.21) qu'à 6 ans (.15), lesquelles tendaient à être inférieures à celles observées à 4 ans (.19), $p<.001$ et $p=.06$ respectivement. En résumé, on peut remarquer que les enfants les plus jeunes se trompaient davantage sur le nombre d'items à restituer que les plus grands.

Pour aller plus loin dans l'analyse, les erreurs d'identité étant les plus nombreuses à tous les âges, la restitution des items selon leur identité a été analysée. Ainsi, une première analyse a porté sur les erreurs dans les essais comptant une seule poupée sur la ligne d'arrivée puisque ce sont les seuls essais où l'identité de l'item était la seule information à maintenir en mémoire au cours du temps. La seconde analyse a porté sur la proportion d'items correctement restitués, c'est-à-dire la proportion de poupées de la séquence-

modèle placées sur la ligne d'arrivée sans tenir compte de leur positionnement dans la séquence.

Essais à 1 poupée

Le nombre d'essais à une poupée réussis a donc été comptabilisé pour chaque sujet et chaque condition expérimentale de rappel puis divisé par le nombre de sujets de chaque âge afin de connaître le nombre moyen d'essais réussis par condition expérimentale. Les scores observés étaient très élevés et révélaient un effet plafond à 5 ans en rappel immédiat (2 essais sur 2 réussis), ainsi qu'à 6 ans en rappel immédiat et différé de 4 secondes (performance parfaite là aussi, Figure 7.12). On remarque aussi que les performances interindividuelles variaient énormément, et ce d'autant plus que les enfants étaient jeunes, les écarts-types étant très élevés. Une ANOVA a ensuite été conduite sur ces moyennes avec l'âge (4, 5 et 6 ans) comme facteur inter-sujet et le délai (0, 4, 8 et 12 secondes) comme facteur intra-sujet. Cette analyse confirmait un effet de l'âge sur les performances de rappel, les enfants de 4 ans réussissant moins d'essais à 1 poupée (1.74 sur 2 essais) que les enfants de 5 ans (1.86) et 6 ans (1.96), $F(2, 35)=9.38, p<.001, \eta^2=.35$.

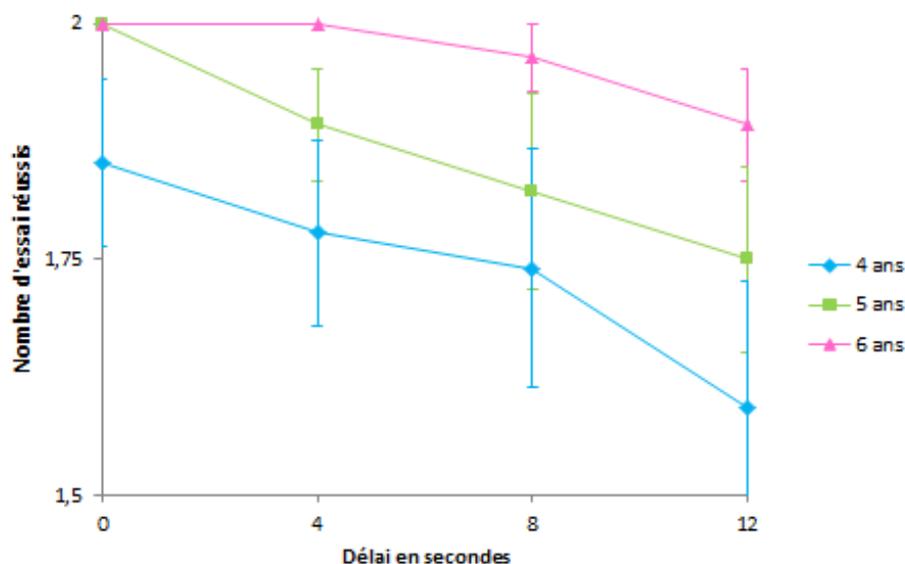


Figure 7.12. Nombre d'essais réussis (sur 2) pour les essais à 1 poupée en fonction du délai de rétention (0, 4, 8 et 12 secondes) et l'âge (4, 5 et 6 ans).

De même que précédemment, les performances diminuaient aussi quand le délai entre la présentation du modèle et sa réalisation par l'enfant augmentait, $F(3, 105)=6.37$,

$p < .001$, $\eta^2 = .15$. Ainsi, le rappel immédiat entraînait des performances supérieures (1.95) aux rappels différés (1.82), $F(1, 80) = 7.32$, $p < .01$. Les performances diminuaient au fur et à mesure que le délai de rétention augmentait (1.89, 1.84, 1.75 à 4, 8 et 12 secondes respectivement) sans que les écarts entre deux délais proches ne fussent à atteindre la significativité, $ps > .23$. Seul l'écart entre les performances à 4 et 12 secondes était significatif, $p < .03$. Enfin, l'effet du délai sur les performances était le même au travers des âges, $F < 1$.

Proportion d'items correctement restitués

Pour cette variable dépendante, le nombre d'items correctement restitués, c'est-à-dire de poupées de la séquence-modèle ayant été replacées sur la ligne d'arrivée et ce, quel que soit leur ordre, a été calculé en fonction de l'âge des sujets (i.e. 4, 5 et 6 ans) et de la condition expérimentale de rappel (i.e. délai de rétention de 0, 4, 8, et 12 secondes). Ensuite, le nombre a été rapporté au nombre total d'items à restituer (i.e., 30 items) pour obtenir la proportion d'items correctement restitués. Une ANOVA a ainsi été conduite sur ces proportions avec l'âge (4, 5 et 6 ans) comme facteur inter-sujet et le délai de rétention (0, 4, 8 et 12 secondes) comme facteur intra-sujet.

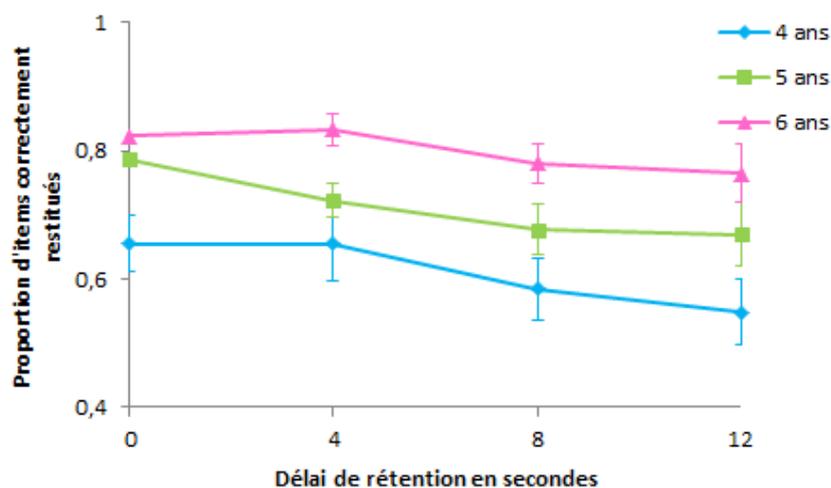


Figure 7.13. Proportion d'items correctement restitués en fonction du délai de rétention en secondes (0, 4, 8 et 12 secondes) et de l'âge (4, 5 et 6 ans). Les barres représentent les erreurs standards.

Les résultats confirment un effet de l'âge sur les performances de rappel, $F(2, 80) = 27.37$, $p < .0001$, $\eta^2 = .41$. La proportion d'items correctement restitués était plus faible à 4

ans (.61) qu'à 5 ans (.71), et plus faible à 5 ans qu'à 6 ans (.80), $ps < .002$. De plus, les performances de rappel s'amenuisaient au fil du temps, les performances en rappel immédiat (.76) étant supérieures à celles des rappels différés (.69), $F(1, 80) = 17.59$, $p < .0001$. En outre, plus le rappel était différé et plus les performances de rappel diminuaient, hormis après 8 secondes où les performances restèrent stables (.74, .68 et .66 à 4, 8 et 12 secondes respectivement), $ps < .001$ et $p = .34$ respectivement. Comme pour les expériences 2 et 3 et les autres variables étudiées auparavant, l'impact du délai de rétention sur les performances était le même au travers des âges, l'interaction entre les deux facteurs n'étant pas significatif, $F < 1$.

Conclusion de l'étude 4

L'objectif de cette expérience était, au travers d'un nouveau paradigme original, de répliquer les résultats obtenus au travers des expériences précédentes à savoir une diminution des performances au travers du temps, et la similarité de la vitesse de l'oubli de l'information au travers des âges. Malgré la complexification de la tâche par introduction d'un item supplémentaire dans le set et l'utilisation d'objets difficilement dénommables, la tâche s'est révélée accessible aux jeunes enfants. Ainsi, le pourcentage d'essais réussis à 1 poupée était supérieur à 87% à 4 ans pour atteindre 98% à 6 ans, tous délais confondus, et était encore de 79% à 4 ans et 94% à 6 ans après 12 secondes de rétention. L'utilisation de ce nouveau paradigme a permis de mettre en évidence l'augmentation des performances de rappel avec l'âge ainsi que les deux résultats attendus, i.e. la diminution des performances de rappel au cours du temps et la similarité de la vitesse de l'oubli au travers de l'âge.

Premièrement, l'expérience 4 a ainsi permis de répliquer l'augmentation des performances de rappel avec l'âge. Comme dans les expériences 2 et 3, l'empan augmentait avec l'âge, passant de 1.29 à 2.20 de 4 à 6 ans, soit près d'un demi-point par an, résultat confirmé par l'effet d'âge observé sur les ordonnées à l'origine. Il est intéressant de noter qu'au cours des 3 expériences, l'augmentation développementale de l'empan était toujours d'un peu moins d'un demi-point par an, soit .95 en deux ans pour l'expérience 2, .40 en un an dans l'expérience 3 et .84 en deux ans dans l'expérience 4. Ces résultats montrent surtout

que nos deux tâches d'évaluation du maintien à court terme des jeunes enfants reproduisent les résultats bien connus de la littérature (voir Simmering & Perone, 2013 pour une revue de littérature) et évaluent donc bien ce qu'elles sont censées évaluer.

Deuxièmement, la diminution des performances de rappel au cours du temps a été le deuxième effet répliqué. Comme cela avait déjà été mis en évidence dans les expériences précédentes, les performances de rappel, quelle que soit la variable indépendante considérée, étaient supérieures en rappel immédiat qu'en rappel différé. Le délai de rétention avait donc, quelle que soit la méthodologie utilisée, un effet néfaste sur les performances de rappel. Ce résultat est important puisqu'il nous permet de montrer, comme cela sera discuté ci-après, que même lorsque l'enfant ne met pas en œuvre de tâche secondaire durant le délai de rétention, les performances de rappel diminuent avec le temps. Le jeune enfant est passif dans son maintien de l'information, celle-ci est oubliée peu à peu au cours du temps, conformément à Camos et al. (2011).

Troisièmement, les performances diminuaient linéairement au cours du temps et similairement dans les trois groupes d'âges, résultat confirmé par l'absence d'interaction entre les deux facteurs et l'absence d'effet d'âge sur les pentes individuelles de régression. Ce dernier résultat a été observé au travers de chacune des expériences menées. C'est aussi le résultat de l'étude le plus innovant puisque la vitesse d'oubli n'avait jamais encore été étudiée chez le jeune enfant. En outre, les études menées chez les enfants et les adultes montraient des résultats contradictoires, et ce parfois pour des groupes d'âges équivalents (Keller & Cowan, 1994 ; Saults & Cowan, 1996, Exp2 ; Saults & Cowan, 1996, Exp1 ; Cowan et al., 2000). Au travers de nos trois expériences et des deux paradigmes utilisés, il apparaît que la vitesse d'oubli de l'information est similaire de 2 à 6 ans.

DISCUSSION

Le principal objectif de l'étude rapportée dans ce septième chapitre, au sein de la partie expérimentale, était d'étudier, au travers de deux nouveaux paradigmes adaptés aux jeunes enfants, la vitesse d'oubli de l'information en mémoire à court terme. Ces deux paradigmes, inspirés de la méthodologie Brown-Peterson (Brown, 1958 ; Peterson & Peterson, 1959) consistaient à introduire un délai entre la présentation des items à retenir et la phase de rappel de ces items. Ils ont été conçus pour se faire rejoindre les deux courants de recherche sur le maintien à court terme. Ainsi, ces paradigmes permettent d'adopter une stratégie de calcul d'un écart, comme chez les enfants plus âgés et les adultes, tout en utilisant une tâche à la portée des plus jeunes, i.e. la reproduction d'un modèle réalisé sous leurs yeux. L'introduction du délai entre la présentation du modèle et la réalisation par l'enfant permet aussi d'explorer l'impact du délai sur les performances de rappel, à l'identique des paradigmes utilisés chez les bébés comme celui d'imitation différée de séquences d'actions (Kagan, 1981 ; Alp, 1994 ; voir aussi Bauer, 2002 pour une revue). En outre, l'approche de ces deux paradigmes est originale puisque l'attente due à l'introduction du délai de rétention est intégrée dans la tâche-même et prend ainsi tout son sens. Les enfants n'attendent pas simplement parce qu'on leur a demandé d'attendre avant de réaliser la tâche mais bien parce qu'il y a une bonne raison pour cela. Soit le magasin n'est pas encore ouvert, et l'enfant doit donc patienter qu'il ouvre pour pouvoir « faire les courses », soit le signal qui donne le départ de la course n'a pas été donné et l'enfant ne peut donc faire s'élancer les poupées sur la piste. Le sens donné au délai de rétention place ainsi les jeunes enfants dans l'attente de la tâche à réaliser, les aidant ainsi à maintenir leur attention dirigée vers cette tâche. Ceci est particulièrement important chez les jeunes enfants, entre 2 et 6 ans, car leurs capacités de maintien de l'attention et d'inhibition des informations non pertinentes sont faibles du fait de la maturation du cortex frontal (Kagan & Baird, 2004 ; Livesay & Morgan, 1991 ; Diamond, Prevor, Callender & Druin, 1997). Outre que ces deux paradigmes se sont révélés tout à fait utilisables avec les très jeunes enfants, ils conduisent à mettre en lumière de manière tout à fait similaire trois résultats fondamentaux. Tout d'abord, les performances de rappel augmentent régulièrement avec l'âge de 2 à 6 ans, résultat déjà exploré dans la littérature. Ensuite, les performances de

rappel diminuent régulièrement au cours du temps qui passe. Enfin, la vitesse de l'oubli de l'information est similaire au travers des âges explorés, résultat mis en évidence pour la première fois chez des jeunes enfants.

Les deux tâches présentées dans ce chapitre étaient donc utilisables chez les jeunes enfants. En effet, aucun enfant n'a été éliminé du groupe expérimental pour incompréhension de la tâche et ce, même chez les plus jeunes (i.e. expérience 3). Seuls les résultats de deux enfants n'ont pas été pris en compte dans les analyses statistiques (i.e. un dans l'expérience 2 et un dans l'expérience 4) du fait que leurs performances étaient inférieures de plus de deux écarts-types de la moyenne de leur âge, soit seulement deux enfants sur les 237 testés. De plus, la difficulté de chacune des tâches était adaptée à l'âge des enfants. En effet, nous n'avons pas observé d'effet plancher, les empan des enfants les plus jeunes (i.e. expérience 3) étant très significativement supérieures au seuil du hasard. De la même façon, il n'y a pas eu d'effet plafond puisqu'aucun enfant n'a réussi à obtenir l'empan maximal pouvant être obtenu et ce, même en rappel immédiat. Ainsi, ces deux tâches, en demandant le stockage d'informations en vue d'être utilisées pour une action ultérieure (i.e. tâche de type observer-réaliser) sont comme le défendaient Pelphrey et Reznick (2003) une mesure des capacités de mémoire de travail des jeunes enfants. Ces tâches ont en outre l'avantage de récolter des données sur les performances de maintien à court terme des jeunes et très jeunes enfants que ce soit en termes d'empan (i.e. nombre d'items pouvant être maintenus) ou en termes de capacité temporelle (i.e. temps durant lequel les informations peuvent être maintenues). Elles permettent ainsi, à l'identique des études menées chez les enfants plus âgés, de mettre en lumière une augmentation développementale de l'empan et, à l'identique des études menées chez les plus jeunes, de mettre en évidence l'oubli de l'information au cours du temps (Kagan, 1981 ; Diamond & Doar, 1989 ; Reznick et al., 1997, 1998 ; Pelphrey et al., 2003).

Le premier résultat des études présentées ici est donc une mise en évidence de l'augmentation développementale des performances de maintien de l'information à court terme chez les enfants entre 2 et 6 ans. Ce résultat rejoint donc ceux déjà mis abondamment en évidence dans la littérature (Dempster, 1981 ; Case et al., 1982 ; Barrouillet, Gavens,

Vergauwe, Gaillard, & Camos, 2009; Bayliss, Jarrold, Baddeley, Gunn, & Leigh, 2005; Gathercole, 1999; Gathercole, Pickering, Ambridge, & Wearing, 2004, voir aussi Simmering & Perone, 2013 pour une revue). Mais ce résultat prouve surtout que nos deux tâches, conçues pour être utilisables chez les jeunes et très jeunes enfants, reproduisent les résultats des paradigmes existants. Que l'on considère le maintien d'un item unique (i.e. un seul fruit ou une seule poupée), les performances de rappel des items sans tenir compte de l'ordre, ou encore la mesure d'empan telle qu'elle est classiquement évaluée chez les enfants plus âgés et les adultes, les performances augmentent avec l'âge. Ces résultats sont par ailleurs confirmés par les valeurs des ordonnées à l'origine calculées à partir des pentes de régression individuelles. On notera toutefois que deux résultats particuliers ont attiré notre attention.

Le premier résultat particulier est que les performances des enfants de 3 ans à 3 ans et demi n'étaient pas significativement supérieures à celles des enfants de 2 ans et demi à 3 ans au sein de l'expérience 3. Notre paradigme ne manque toutefois pas de sensibilité puisque l'analyse des items rappelés dans une position conforme au modèle montre une différence dans la quantité des items pouvant être traités en fonction de l'âge. Ainsi, dans les essais à 3 et 4 fruits, alors que les deux groupes d'enfants les plus jeunes (i.e., les 2-2,5 et les 2,5-3 ans) ne voient pas leurs performances dépasser le seuil du hasard, celles des plus grands (i.e. les 3-3,5 ans) sont significativement supérieures au seuil du hasard. Ainsi, si 3 items à maintenir est au-delà des capacités mémorielles des enfants de 2 à 3 ans, il semble que le nombre d'items pouvant être traités augmentent et peut atteindre 3 items à partir de 3 ans.

Le deuxième résultat particulier est que les empan de chaque groupe d'âge étaient inférieurs dans l'expérience 4 que dans l'expérience 2. Ainsi, en rappel immédiat, les empan étaient de 1.23, 1.49, et 1.63 à 4, 5 et 6 ans respectivement dans l'expérience 4, alors qu'ils étaient de 2.06, 2.60, et 2.95 à 4, 5 et 6 ans respectivement dans l'expérience 2. L'écart observé entre les performances était significatif pour chacun des groupes d'âges, $p < .001$. Le paradigme utilisé dans l'expérience 4 (i.e. la course de ski des poupées) s'est donc révélé plus difficile que celui de la marchande utilisé dans l'expérience 2. Plusieurs explications peuvent être avancées pour justifier cet écart. Premièrement, la course de skis des poupées

impliquait un plus grand nombre de distracteurs dans le set des objets à repositionner, notamment pour les plus jeunes. En effet, l'expérience 4 comptait 6 poupées différentes dans le set d'objets à repositionner pour chacun des groupes d'âge, alors que dans l'expérience 2, les 6 ans disposaient de 5 fruits dans leur boîte, les 5 ans de 4 fruits et les 4 ans de 3 fruits. Or, on sait que la capacité à focaliser son attention sur les informations pertinentes et à inhiber les distracteurs de l'environnement se développe fortement entre 2 et 6 ans (Harman & Fox, 1997 ; Rothbart & Posner, 2001). Ainsi, dans l'expérience 4, les enfants les plus jeunes auraient dû être davantage pénalisés que les enfants de 5 ans, eux-mêmes davantage pénalisés que les enfants les plus grands. Or, l'écart entre les performances en rappel immédiat aux deux études était assez similaire dans chacun des groupes d'âges (.54, .62 et .59, pour les 4, 5 et 6 ans respectivement), ce qui invalide l'hypothèse de l'influence de ce premier facteur sur les différences de performance observées entre les deux expériences. En outre, les items utilisés dans l'expérience 2 étaient facilement dénommables par les enfants, et de plus, l'expérimentateur verbalisait l'ordre d'introduction des fruits dans le sac au moment de la présentation du modèle. A l'opposé, les items utilisés dans l'expérience 4 avaient été choisis pour ne pas être facilement dénommés par les enfants, les poupées ne portant pas de nom spécifique. Ainsi, les items de l'expérience 2 pouvaient être traités par un code visuel et/ou un code phonologique alors que les items de l'expérience 4 ne pouvaient être traités que par un code visuel, le recodage phonologique étant très compliqué à mettre en œuvre du fait que les poupées ne portaient pas de nom spécifique. Or, les enfants de 4 ans utilisent davantage un codage visuel pour mémoriser l'information, alors qu'un double codage, visuel et phonologique, se met en place à 5-6 ans avant l'utilisation d'un codage exclusivement phonologique à partir de 6 ans (Henry, Messer, Luger-Klein & Crane, 2012). Les enfants de 4 ans auraient donc dû être moins gênés par l'utilisation de stimuli non dénommables comme les poupées en bois que leurs aînés. Encore une fois, la stabilité de l'écart de performance entre les trois groupes d'âge semble invalider cette hypothèse. Troisièmement, les items utilisés dans l'expérience 2 étaient des items beaucoup plus familiers pour les enfants que les poupées en bois. Or, Hulme et al. (1984) avaient montré que les performances de rappel étaient supérieures dans le cas de stimuli familiers contrairement à des stimuli non familiers. En outre, les fruits étaient beaucoup plus facilement et globalement identifiables que les poupées en bois. En

effet, les fruits différaient globalement par leur forme et leur couleur, alors que les poupées différaient par des aspects beaucoup plus fins et discrets comme la couleur et les ornements des kimonos, ou les détails du visage des poupées. Les distinguer demandait donc une meilleure analyse visuelle et davantage de ressources attentionnelles. D'ailleurs, si les erreurs d'ordre ont été majoritaires dans l'expérience 2, ce sont les erreurs d'identité qui ont été les plus nombreuses dans l'expérience 6, ce qui révèle que les enfants ont certainement eu, à tous les âges, plus de difficultés à discerner les poupées entre elles que les fruits. Ainsi, les caractéristiques intrinsèques des items utilisés dans l'une et l'autre expérience peuvent être à l'origine des différences de performances observées (Dempster, 1981; St Clair-Thompson, 2012). Cependant, ce qu'il est important de noter, c'est qu'au sein de ces deux expériences visant les mêmes âges, i.e. 4, 5 et 6 ans, les écarts de performances entre les différents âges sont très similaires. En effet, dans l'expérience 2, les enfants gagnent .89 d'empan en 2 ans, de 4 à 6 ans, soit .445 de moyenne d'empan par an. Dans l'expérience 4, les enfants gagnent .84 point d'empan en 2 ans, soit .42 point d'empan par an. Ainsi, même si les notes d'empan sont plus faibles dans l'expérience 4 du fait d'une plus grande complexité de la tâche, on s'aperçoit que les performances évoluent de la même manière dans les deux expériences. Ces deux paradigmes reproduisent donc bien les résultats observés avec les paradigmes classiques de mesure des capacités en mémoire de travail. D'autre part, et de manière plus forte encore, l'écart des performances entre les enfants de 2 à 2 ans et demi et 3 à 3 ans et demi est de .40 en un an. Ainsi, la progression des performances en termes de gain d'empan paraît relativement stable entre 2 et 6 ans.

Le deuxième résultat fort de cette étude, qui représente cette fois un apport nouveau par rapport aux données de la littérature, est le déclin des performances observées au cours du temps. En effet, que ce soit l'un ou l'autre paradigme, que ce soit entre 2 et 3 ans et demi ou entre 4 et 6 ans, que ce soit en considérant l'empan ou le rappel des items sans tenir compte de l'ordre, que ce soit sur le rappel d'un item unique ou de séquences plus longues, les performances de rappel diminuaient au cours du temps. Deux hypothèses clés sont traditionnellement avancées par les auteurs pour expliquer l'oubli de l'information au cours du temps. La première hypothèse est que le niveau d'activation en mémoire des items

est maximal au moment de l'encodage et qu'il diminue ensuite graduellement, et ce jusqu'à devenir si faible que les traces sont alors irrécupérables, si rien n'a été fait pour les réactiver ou les restaurer. La répétition subvocale comme le rafraîchissement attentionnel sont deux mécanismes permettant de contrecarrer le déclin temporel de l'information en permettant la réactivation des traces mémorielles à travers le focus attentionnel. Cette première hypothèse expliquant l'oubli de l'information au cours du temps est défendue dans les trois modèles de mémoire de travail présentés dans la partie théorique (Baddeley, 1986 ; Cowan, 1999 ; Barrouillet et al., 2004). Dans notre étude, les enfants étaient libres d'utiliser une stratégie de maintien de l'information puisque le délai de rétention était vide, c'est-à-dire qu'il n'était pas occupé à mettre en œuvre une tâche secondaire. Ainsi, si les enfants ont malgré tout oublié l'information au cours du temps, cela signifie qu'ils n'ont justement pas mis en œuvre de stratégie de maintien de l'information et qu'ils ont opéré un maintien passif de l'information comme défendu par Camos et al. (2011). Chez ces jeunes enfants, l'information à maintenir souffre du seul passage du temps. La deuxième hypothèse avancée pour expliquer l'oubli de l'information au cours du temps consiste à dire que l'information est oubliée car d'autres représentations viendraient interférer avec celles des items à maintenir (Lewandowsky, Oberauer, & Brown, 2009 ; Berman, Jonides, & Lewis, 2009 ; Nairne, 1990). Ainsi, quand les items à maintenir sont encodés, leur niveau d'activation dans le système est maximal. Durant le délai de rétention, d'autres représentations sont créées, par exemple par la mise en œuvre d'une tâche secondaire, et viennent interférer avec les représentations initiales, en mobilisant une partie de l'attention. L'attention engagée sur les représentations interférentes augmenterait leur niveau d'activation au détriment des items à maintenir (Tam et al., 2010). Plus le délai de rétention est long, et plus les interférences risquent d'être nombreuses et donc plus la probabilité de retrouver l'information source est alors faible. La capacité en mémoire de travail est d'ailleurs considérée par Engle et al. (1999) comme la « *capacité d'attention contrôlée, soutenue face à de l'interférence ou de la distraction* ». Bien sûr, dans notre étude, le délai de rétention est vide, c'est-à-dire que les enfants n'ont pas à mettre en œuvre de tâche secondaire durant ce délai. Pour autant, les interférences provenant de l'environnement (e.g. bruits provenant du couloir, enfants dans la cour de récréation, affichages sur les murs etc) comme du monde interne de l'enfant (e.g. penser qu'il a faim, qu'il aimerait aller aux toilettes, qu'il aime bien son nouveau pull etc)

sont suffisantes chez ces jeunes enfants, qui ont des difficultés dans le contrôle attentionnel, pour créer des représentations interférentes et gêner la récupération des informations en mémoire. D'ailleurs, Lloyd, Newcombe et Doydum (2009) défendent l'idée que l'amélioration développementale des capacités mémorielles entre 4 et 6 ans serait davantage liée à une amélioration des capacités de récupération de l'information plutôt qu'une amélioration dans l'encodage de cette information. Toutefois, dire que les enfants ont, au cours de notre étude, oublié l'information au cours du temps ne permet pas de privilégier une hypothèse d'explication de l'oubli de l'information au cours du temps plus qu'une autre. En revanche, le troisième résultat important de notre étude permet d'avoir davantage d'éléments de discussion.

Le troisième résultat important de notre étude est donc fondamental car il n'avait encore jamais été mis en évidence aux âges étudiés, soit entre 2 et 6 ans. Ainsi, au sein de chacune des expériences rapportées dans ce chapitre, les performances des enfants ne déclinaient pas différemment selon les âges, mais bien à la fois linéairement au cours du temps et avec la même vitesse dans chacun des groupes d'âges. En effet, les droites de régression illustraient le caractère linéaire du déclin avec des coefficients de détermination compris entre .89 et .99 pour l'empan moyen d'items rappelés. D'autre part, l'interaction entre l'âge et le délai de rétention n'était jamais significative ni n'approchait la significativité, montrant là encore que l'effet du délai de rétention était similaire au travers des âges. Enfin, des analyses complémentaires menées sur les pentes de régression individuelles révélaient que celles-ci ne différaient pas d'un âge à l'autre, confirmant une fois encore la similarité du déclin des performances. La linéarité et la similarité de l'oubli au cours du temps mis en évidence par notre étude impliquent 3 conséquences. La première conséquence est que notre étude confirme que les enfants entre 2 et 6 ans ne mettent pas en œuvre de stratégie de maintien de l'information puisque le déclin est linéaire et similaire au travers des groupes d'âges. En effet, si des stratégies étaient mises en œuvre, alors elles aideraient à contrecarrer l'oubli temporel et les performances resteraient stables au cours du temps. Ce résultat a déjà été largement étudié et documenté chez les nourrissons et les très jeunes enfants (voir Pelphrey & Reznik, 2002 pour une revue). Notre étude montre que cette absence de mise en œuvre de stratégie de maintien perdure donc au moins jusqu'à 6 ans. Ce résultat est d'ailleurs en adéquation avec l'hypothèse souvent défendue de l'émergence de

stratégie de maintien à partir de 7 ans (Dempster, 1985; Gathercole & Adams, 1993 ; Hitch & Halliday, 1983 ; Gathercole, 1999). D'autre part, si la mise en œuvre de ces mécanismes de maintien s'opérait entre 2 et 6 ans, alors les résultats indiqueraient, au moins pour les enfants les plus âgés, une diminution de la pente du déclin. Or, quelle que soit l'expérience considérée, les pentes étaient similaires au travers des âges et ce, même pour les plus âgés. Cet état de fait va dans le sens d'une absence d'utilisation spontanée de mécanisme de maintien chez l'enfant avant 7 ans, comme le défendent Camos et Barrouillet (2011).

La deuxième conséquence du résultat, mettant en évidence la linéarité de l'oubli au travers du temps et la similarité de l'oubli au travers des âges, est que notre étude permet d'apporter une évidence claire et robuste que la vitesse d'oubli de l'information ne change pas durant l'enfance, du moins entre 2 et 6 ans. Précédemment, les études menées chez des enfants plus grands et des adultes sur l'oubli de l'information au cours du temps décrivaient des résultats qui pouvaient être contradictoires. Cependant, les méthodologies employées étaient plus compliquées étant donné que l'âge des sujets, de 6-7 ans à l'âge adulte, impliquait de contrer les mécanismes de maintien de l'information afin de pouvoir quantifier le déclin temporel de l'information. Ainsi, le rappel portait sur des items que les sujets étaient censés ignorer, i.e. du discours ou des sons. Ainsi, Keller et Cowan (1994) et Saults et Cowan (1991, Expérience 2) ont mis en évidence une diminution de la vitesse d'oubli entre 6-7 ans et l'âge adulte, alors que Saults et Cowan (1991, expérience 1) et Cowan et al. (2000) ont montré au contraire une perte d'information similaire à 8, 11 ans et à l'âge adulte. Dans notre étude, l'utilisation d'une méthodologie simple, le maintien de l'information des jeunes enfants étant passif et souffrant du passage du temps, a permis de faire émerger des résultats clairs et robustes, i.e. le déclin de l'oubli de l'information est linéaire et sa vitesse est similaire d'un âge à l'autre entre 2 et 6 ans. Bien sûr, le fait que les pentes de déclin évaluées au travers de l'étude sont supérieures au sein de l'expérience expérience 2 (i.e. $-.08$ à $-.10$) qu'au sein des expériences 3 et 4 (i.e. $-.04$ à $-.05$ et $-.03$ à $-.05$ respectivement) a attiré notre attention. Le fait que la méthodologie (i.e. nombre d'items présents, nombre d'essais réalisés) soit différente d'une expérience à l'autre a probablement eu une influence sur les pentes de régression comme elle en a eu sur les valeurs d'empan. La variation des résultats du fait de changement dans la méthode et le matériel employés est d'ailleurs un résultat bien connu (Dempster, 1981; St Clair-Thompson, 2012). Toutefois, ce qu'il est important à

noter et qui montre la robustesse de nos résultats est que, à l'intérieur d'une même étude, et donc avec l'utilisation d'un même protocole, les pentes étaient similaires au travers des âges concernés. Ceci confirme une absence de modification de la vitesse de l'oubli de l'information avec l'âge, en tous les cas, entre 2 et 6 ans. Or selon le TBRS (Barrouillet et al., 2004, 2009), les trois facteurs à l'origine de l'augmentation développementale de l'empan sont la quantité d'attention disponible chez le sujet, la mise en œuvre de mécanismes de maintien et la vitesse de déclin de l'information en mémoire au cours du temps (Barrouillet, et al., 2004, 2009 ; Camos & Barrouillet, 2011a, 2011b). Ainsi, puisque les enfants entre 2 et 6 ans ne mettent pas spontanément en œuvre de mécanisme de maintien de l'information et que la vitesse de déclin ne semble pas évoluer entre 2 et 6 ans, alors on peut penser que c'est bien l'amélioration de la quantité d'attention disponible, ou un meilleur contrôle attentionnel, qui est à l'origine de l'augmentation développementale des capacités de maintien de l'information à court terme. Ces résultats rejoignent d'ailleurs les études menées chez des enfants plus grands et des adultes (Barrouillet & Camos, 2001; Gaillard, et al., 2011; Gavens & Barrouillet, 2004) ainsi que de grands modèles théoriques (Halford, 1993; Pascual-Leone, 1970).

La troisième conséquence du résultat, mettant en évidence la linéarité de l'oubli au travers du temps et la similarité de l'oubli au travers des âges, est que notre étude permet d'apporter un éclairage nouveau sur les mécanismes à l'œuvre pouvant expliquer l'oubli de l'information au cours du temps. En effet, si l'oubli est le résultat d'interférences entre des représentations émergeant durant le délai de rétention et les représentations des items à maintenir (Lewandowsky, Oberauer, & Brown, 2009 ; Berman, Jonides, & Lewis, 2009 ; Nairne, 1990), alors il faut considérer que la somme de ces interférences conduit finalement à un déclin de l'information qui apparaît comme linéaire au cours du temps. Cela signifie que, pour chacune des trois expériences, le groupe des sujets a subi des interférences d'intensité comparable au cours du temps créant ainsi un déclin linéaire de l'information. D'autre part, l'oubli de l'information étant similaire au travers des âges, cette hypothèse des interférences comme source d'oubli nous amène à considérer que les enfants les plus âgés seraient tout aussi sensibles aux interférences que les enfants les plus jeunes. Or, la capacité

à agir sur les représentations en bloquant les informations non pertinentes pour le but à atteindre (i.e. ici, les représentations interférentes), i.e. l'inhibition conceptuelle (Miyake et al., 2000), devient de plus en plus efficiente entre 3 et 6 ans (Espy, 1997 ; Gerstadt, Hong & Diamond, 1994 ; Gerardi-Caulton, 2000 ; Prevor & Diamond, 2005 ; Simpson & Riggs, 2007). Ainsi, considérer que l'impact des interférences est identique chez les enfants plus âgés que chez les plus jeunes, est difficilement concevable. Finalement, il est assez difficile d'expliquer que la somme des interférences multiples provenant de l'environnement et du monde interne du sujet puisse entraîner un déclin à la fois linéaire, et à la fois similaire au travers des âges. A l'opposé, l'hypothèse du déclin temporel de l'information en mémoire à court terme est tout à fait en adéquation avec nos résultats, i.e. la linéarité de l'oubli au travers du temps et sa similarité au travers de l'âge. En effet, si les traces mémorielles sont activées et que rien n'est fait ensuite pour les réactiver ou les reconstruire, alors leur niveau d'activation diminue peu à peu. Ainsi, chez ces jeunes enfants opérant un maintien passif de l'information en mémoire, i.e. sans mise en œuvre de stratégie de maintien de l'information, les traces mémorielles après avoir été activées au maximum au moment de l'encodage des items à maintenir, déclinent graduellement au cours du temps et ce, de manière similaire au travers de l'âge, entre 2 et 6 ans. Nos résultats plaident donc en faveur de l'existence d'un déclin temporel des traces mémorielles, et ce en l'absence d'interférences dues à la mise en œuvre d'une tâche secondaire et en l'absence de mécanismes de maintien visant à bloquer ce déclin (Barrouillet & Camos, 2012; Barrouillet et al., 2007 ; Barrouillet, Portrat, Vergauwe, Diependaele, & Camos, 2011).

En conclusion, malgré l'ensemble des changements opérés d'une expérience à l'autre, notre étude mène à des résultats identiques. En effet, de nombreux facteurs ont été manipulés au sein de nos trois expériences. Tout d'abord, la méthodologie utilisait une histoire renvoyant à la réalisation d'une séquence soit pour « faire les courses », soit pour « faire faire la course de ski aux poupées » changeant ainsi le contexte global de présentation de la tâche à l'enfant. Ensuite, la méthodologie tenait compte des changements développementaux des sujets en adaptant la difficulté à l'âge des sujets et donc le nombre d'items du set (i.e. expérience 2 ; 3 items à 4 ans, 4 items à 5 ans et 5 items

à 6 ans) ou en proposant au contraire le même nombre d'items aux sujets avec un set composé de 4 items (i.e. expérience 3) ou 6 items (i.e. expérience 4). De même, la longueur maximale de la séquence à maintenir comptait soit tous les éléments du set (i.e. expérience 2 ; 3, 4 ou 5 items parmi 3, 4 ou 5 items respectivement en fonction de l'âge ; expérience 3 ; 4 items) soit tous les éléments du set moins un (i.e. expérience 4 ; 5 items à maintenir sur 6 présents dans le set), soit un item distracteur. D'ailleurs, les items étaient globalement facilement identifiables par leur forme et leur couleur (i.e., les fruits, expériences 2 et 3) ou au contraire étaient différenciés uniquement par des détails fins (i.e. les poupées, expérience 4). En outre, les items utilisés étaient soit aisément dénommables (i.e. fruits) ou non aisément dénommables (i.e. poupées en bois). L'expérimentateur produisait d'ailleurs un code verbal en réalisant le modèle devant les yeux de l'enfant, (i.e. dire le nom des fruits en les introduisant dans le sac, expérience 2) ou au contraire n'en produisait pas en restant silencieux (i.e. expérience 3) ou en émettant juste un son sans dénommer les items (i.e. expérience 4). Enfin, la durée de rétention a été manipulée en proposant un rappel immédiat servant de référence et des rappels différés de 2, 4 et 6 secondes pour l'expérience 2, de 3 et 5 secondes pour l'expérience 3, et de 4, 8 et 12 secondes pour l'expérience 4.

Ainsi, le fait que nos résultats restent identiques malgré tous les changements opérés d'une expérience à l'autre augmente leur robustesse et leur validité. Les performances de rappel augmentent au travers de l'âge entre 2 et 6 ans et diminuent au travers du temps. D'autre part, le déclin des performances est linéaire au cours du temps et similaire au travers des âges, entre 2 et 6 ans. Ceci confirme l'absence de mise en œuvre de stratégie de maintien de l'information à ces âges, et apporte une preuve supplémentaire de l'existence du déclin temporel de l'information en mémoire à court terme, lequel déclin s'opère à une vitesse similaire entre 2 et 6 ans.

8. Impact de la motricité sur les performances de rappel

L'exploration de l'impact de l'activité motrice sur les performances de rappel d'items maintenus à court terme trouve sa source dans les résultats inattendus obtenus dans la première étude rapportée dans cette thèse. L'expérience 1 visait à élaborer un paradigme de la mémoire de travail chez le jeune enfant. Des enfants de 5 ans devaient reproduire une séquence de fruits montrée par l'expérimentateur immédiatement après que le modèle ait été caché ou après un délai de 5 secondes. Le délai pouvait être vide, c'est-à-dire être une simple attente, ou bien pouvait être occupé par une tâche secondaire qui était de marcher jusqu'à la marchande pour prendre les fruits, directement ou en passant sur deux plots représentant des pierres. Nous avons prédit que les performances seraient inférieures lors d'un rappel différé. Cela a bien été le cas lorsque le sujet devait réaliser une tâche secondaire impliquant un coût cognitif élevé (i.e., passer sur des plots) mais aussi lorsqu'il avait simplement à attendre passivement avant de réaliser la tâche. Par contre, quand les enfants marchaient directement jusqu'à la marchande, les performances étaient supérieures à un différé simple, voire restaient stables comparativement au rappel immédiat pour les enfants ayant les plus fortes capacités mémorielles. Finalement, l'introduction de la tâche secondaire impliquant une marche directe vers la marchande semblait permettre de diminuer ou contrecarrer l'effet néfaste du temps qui passe sur les performances de rappel, en tous les cas pour un délai de 5 secondes. Pour expliquer ce résultat inattendu, nous avons émis deux hypothèses. La première hypothèse était que la motricité par elle-même influençait la cognition et notamment permettait d'augmenter le niveau d'activation neuronale disponible, conformément à Adams et al. (1997). Cet excédent d'éveil disponible pourrait être alors mis au service du stockage des informations, augmentant ainsi les performances de rappel comparativement à la condition différée vide. De nombreuses études, dont les résultats sont détaillés ci-après, montrent en effet que l'activité motrice peut influencer la cognition et même améliorer la mémorisation. La deuxième hypothèse était que la marche dirigée directement vers la marchande avait un atout majeur en aidant, par la vue de la marchande, le maintien du but en mémoire. En effet, les jeunes enfants ont des difficultés à maintenir le but de l'activité en mémoire durant son exécution. La vue de la

marchande aurait pu, en limitant le coût cognitif du maintien du but, permettre la mise en œuvre d'une production visant à maintenir les items en mémoire, conformément au modèle ACT-R (Anderson, 1996). Afin de mieux cerner le contexte expérimental des deux études rapportées ci-après ainsi que les variables utilisées, un point théorique sur l'impact de la motricité sur la cognition sera tout d'abord présenté. Ensuite, la question de l'aide au maintien du but en mémoire à partir d'indices visuels en lien avec le modèle ACT-R (Anderson, 1996) sera abordée. Enfin, les objectifs et les hypothèses des deux études seront présentés avant de décrire précisément la méthode et les résultats de chacune d'elle.

8.1. Impact de la motricité sur le fonctionnement cognitif

Les recherches menées sur le lien existant entre la motricité et le fonctionnement cognitif mènent toutes à une même conclusion : la pensée et le corps sont bien plus liés qu'on ne pourrait le penser à prime abord. D'une manière globale, la motricité influe sur la cognition. Ainsi, des études récentes ont montré que l'exercice moteur quotidien réduit le déclin cognitif dû au vieillissement ainsi que le risque de développer la maladie d'Alzheimer (Buchman et al., 2012). Les théories de la cognition enchâssée suggèrent d'ailleurs que nos représentations internes des objets et des événements ne sont pas basées uniquement sur un code propositionnel amodal mais qu'elles sont aussi fonction des systèmes sensorimoteurs qui gouvernent l'action sur ces objets, renforçant par là le lien étroit entre motricité et cognition. Ainsi, la mise en œuvre de l'activité motrice implique un codage sensorimoteur qui s'additionne aux autres codages mis en œuvre par l'activité elle-même.

Dans la vie de tous les jours, les situations de double tâche associant une activité sensorimotrice à une activité cognitive sont nombreuses, par exemple marcher tout en se remémorant la liste de courses oubliée sur la table ou planifier mentalement sa journée du lendemain tout en maintenant l'équilibre dans un bus. Les ressources attentionnelles étant limitées (Kahneman, 1973 ; Wickens, 1991), les performances diminuent quand la demande attentionnelle dépassent les capacités du sujet. Les jeunes enfants qui ont des capacités attentionnelles limitées sont d'ailleurs plus souvent, et de manière plus importante, impactés par des situations de double tâche. En général, les modèles théoriques postulent que les situations de double tâche entraînent soit un maintien soit un déclin des performances. Ainsi, lorsque l'activité motrice impliquée est suffisamment automatisée,

comme dans le cas de la marche chez l'adulte, la situation de double tâche n'entraîne pas de diminution des performances (Lödvén, Schaefer, Pohlmeier & Lindenberger, 2008 ; Schaefer, Lödvén, Wieckhorst, & Lindenberger, 2010).

Il existe toutefois certaines situations dans lesquelles la cognition peut au contraire être améliorée en situation de double tâche quand la motricité est mise en jeu. L'étude de l'impact positif de la motricité sur la cognition d'une manière générale s'organise autour de deux axes que nous allons présenter plus en détail ci-après. Le premier axe est l'exploration de l'amélioration de la cognition et notamment de la mémorisation par la mise en œuvre d'un encodage moteur des informations au travers de l'activité motrice. Cet encodage viendrait compléter les autres encodages impliqués par la situation. Ce domaine est en lien notamment avec la gestuelle mise en œuvre dans les apprentissages tels que les mathématiques ou les langues étrangères. Le deuxième axe est l'étude de l'augmentation du niveau d'éveil neuronal disponible par la mise en œuvre d'une activité motrice. Ce domaine est principalement exploré en psychologie du sport où l'on s'intéresse à l'évolution des performances des athlètes dans l'exercice de leur sport en fonction de l'intensité de l'exercice physique qu'ils fournissent. Les résultats obtenus dans ce domaine de recherche sont intéressants à explorer dans le cadre de notre étude du fait que les paradigmes utilisés dans ces recherches utilisent fréquemment la marche comme activité secondaire motrice.

IMPACT de l'ACTIVITE MOTRICE GESTUELLE sur la COGNITION

Soixante-dix pour cent des enfants et quatre-vingt-huit pour cent des adultes produisent des gestes quand ils expliquent leur raisonnement mathématique (Goldin-Meadow, Nusbaum, Kelly & Wagner, 2001). Ces pourcentages élevés suggèrent que la gestuelle est fonctionnellement bénéfique aux orateurs qui expliquent leur raisonnement. En fait, l'utilisation des gestes améliore les performances dans les tâches sur l'équivalence mathématique (Church, Aiman-Nolley, Mahootian, 2004 ; Perry, Berch, Singleton, 1995), la conservation (Ping & Goldin-Meadow, 2008) et la symétrie (Valenzeno, Alibali, Klatzky, 2003). En effet, du fait qu'ils sont associés au raisonnement spatial (Alibali, 2005 ; Chu & Kita, 2008 ; Kita & Özyürek, 2003) et à l'imagerie mentale (Morsella & Krauss, 2004 ; Wesp, Hesse, Keutmann & Wheaton, 2001), les gestes interviennent dans la modification de la pensée mathématique chez les adultes, mais aussi chez les enfants et ce, très précocement.

Ainsi, Alibali et DiRusso (1999) ont mis en évidence que les gestes de pointage amélioraient les performances précoces de comptage en facilitant le repérage des items mais aussi la coordination entre les mots-nombres de la chaîne verbale et les items à dénombrer. Dans ce dernier cas, la gestuelle est spontanée mais il est important de noter que l'utilisation suggérée de gestes par copie d'un modèle a aussi un effet positif. Ainsi, l'utilisation de gestes par les professeurs incite les apprenants à en utiliser eux-mêmes et donc à profiter davantage de la leçon (Cook & Goldin-Meadow, 2006), jusqu'à atteindre les performances de ceux qui en produisent spontanément (Cook, Yip & Goldin-Meadow, 2011). De plus, des enfants à qui l'on demande de faire des gestes durant l'explication de leur raisonnement inventent significativement plus de stratégies, correctes de surcroît, que ceux à qui on ne donne pas d'instruction, comme si la demande de production de gestes avait encouragé les enfants à exprimer de nouvelles idées (Broaders, Cook, Mitchel & Goldin-Meadow, 2007). L'impact de la gestuelle sur la cognition a donc été mis en évidence dans la mise en œuvre du raisonnement mathématique et la construction des concepts mathématiques.

Par ailleurs, la gestuelle a aussi un impact fort au niveau langagier, raison pour laquelle elle très fréquemment utilisée par les enseignants de langues étrangères pour favoriser et améliorer les processus d'acquisition du langage (Kusagani, 2005 ; Taleghani-Nikazm, 2008). Les gestes réalisés par les apprenants, qui sont de véritables mises en acte des mots, permettent en effet de faciliter la mémorisation de mots et de phrases comparativement à un encodage verbal isolé (Zimmer, 2001a ; Engelkamp & Krumnacker, 1980 ; Saltz & Donnenwerthnolan, 1981), d'améliorer leur accessibilité (Masumoto et al., 2006 ; Spranger, Schatz & Knopf, 2008 ; Schatz, Spranger, Kubik & Knopf, 2011) et de différer leur oubli (Quinn-Allen, 1995 ; Macedonia, 2003 ; Tellier, 2008). Ce qui est intéressant, c'est que tous les sujets peuvent bénéficier de cette aide à l'apprentissage qu'est l'utilisation des gestes (Rusted, 2003), aussi bien les sujets sains que les déficients mentaux (Cohen & Bean, 1983), les patients avec troubles de la mémoire ou démence modérée (Hutton, Sheppard, Rusted & Ratner, 1996) et les patients en rééducation après un accident vasculaire cérébral (Nadar & McDowd, 2008). De plus, un effet bénéfique de la mise en activité motrice sur la mémorisation des actions et des phrases a été mis en évidence aussi chez les enfants dès 6 ans très récemment (Mecklenbräucker, Steffens, Jelenec & Goergens, 2011 ; Stevanoni & Salmon, 2005 ; So, Chen-Hui, & Wei-Shan, 2012). Deux

explications qui ne s'excluent pas mutuellement sont principalement avancées dans l'explication de l'effet bénéfique de la gestuelle sur la cognition. Premièrement, Zimmer et Cohen (2001) défendent l'idée que la mise en œuvre motrice entraîne un effet de « mise en acte », i.e. *the enactment effect*. En fait, la mise en œuvre motrice conduirait à l'élaboration de représentations plus riches et plus élaborées car elle engage le système moteur alors que les autres activités (i.e. imaginer l'action, regarder un autre faire l'action, écouter) ne le font pas. Un traitement plus profond lié à des représentations plus riches conduit à une mémorisation de meilleure qualité (Craig & Lockhart, 1972). Deuxièmement, la gestuelle aurait un impact sur la cognition car sa mise en œuvre serait fortement liée à la mémoire de travail. Si la gestuelle est liée à la parole et l'étaye, les deux modalités participeraient à la réalisation de la tâche, diminuant ainsi son coût cognitif. Goldin-Meadow (2011) montre ainsi que les gestes préservent les ressources cognitives et permettent à ceux qui parlent en s'appuyant sur les gestes d'allouer davantage de ressources cognitives aux tâches mémorielles, améliorant par-là leurs performances. Cette idée d'allègement du coût cognitif de la tâche grâce à une mise en œuvre motrice rejoint d'ailleurs les études réalisées en psychologie du sport sur l'impact de l'activité motrice elle-même sur la cognition.

*AUGMENTATION de la QUANTITE d'ACTIVATION NEURONALE
DISPONIBLE grâce à L'ACTIVITE MOTRICE*

L'impact de l'effet des situations de double-tâche cognitivo-sensorimotrice a surtout été étudié en psychologie du sport. Les chercheurs s'intéressaient ainsi à la capacité des sujets à mener une activité cognitive de qualité quand les ressources attentionnelles devaient se partager avec la mise en œuvre de l'exercice physique. La mise en œuvre d'une activité motrice peut impacter négativement les performances cognitives des sujets. C'est le cas notamment quand le sujet est novice dans l'activité motrice concernée. Ainsi, quand des sujets doivent réaliser une tâche cognitive secondaire à une tâche motrice, les golfeurs avertis réussissent mieux la tâche cognitive couplée à la réalisation d'un putt que les débutants (Beilock et al., 2002b ; pour des études sur les gymnastes, voir Vuillerme & Nougier, 2004). Les enfants, qui ont des capacités attentionnelles limitées, voient leurs performances diminuer plus massivement que les adultes dans les situations de double

tâche (Guttentag, 1989 pour une revue de littérature), effet répliqué lorsque l'une des tâches est motrice (Huang & Mercer, 2001 pour une revue). Par exemple, Krampe, Schaefer, Linderberger et Baltes (2008) ont montré que seuls les enfants de 9 ans voyaient leurs performances diminuer dans une tâche de fluence verbale lorsqu'ils marchaient sur une piste étroite alors que les enfants plus âgés et les jeunes adultes maintenaient leurs performances dans la situation de double tâche.

Toutefois, lorsque l'exercice physique mis en œuvre consiste en une action automatisée et d'intensité modérée (Davranche, Burle, Audiffren & Hasbroucq, 2005, 2006 ; McMorris & Graydon, 2000), il y a une amélioration des performances mémorielles (Tomprowski, 2003 pour une revue), du contrôle attentionnel sur la tâche (Davranche & McMorris, 2009) et même des temps de réaction (Kahenman, 1973 ; Davranche & Audiffren, 2004 ; Collardeau et al., 2001). En fait, l'exercice physique de faible intensité aiderait les sujets à éviter l'ennui dû à la situation de double tâche en maintenant un niveau d'éveil attentionnel, i.e. *arousal*, constant. Adam, Teeken, Ypelaar, Verstappen et Paas (1997) définissent le niveau d'éveil comme *une dimension conceptuelle générale allant de la somnolence à l'excitation extrême et qui s'exprime à travers des critères psychophysiologiques (i.e., vitesse cardiaque, conductance de la peau, fréquence respiratoire), émotionnels et comportementaux (p.218)*. Ces modifications globales de l'état physiologique du sujet (McMorris & Graydon, 2000, Peyrin, Pequignot, Lacour & Fourcade, 1987) ont un impact sur d'autres processus cognitifs que la mémorisation, et particulièrement sur les fonctions exécutives, le cortex préfrontal et le cortex cingulaire antérieur (Hillman, Erickson et Kramer, 2008 pour une revue). De plus, des études de neuroimagerie montrent qu'au travers du temps (i.e. de plusieurs semaines à plusieurs mois d'exercice quotidien) le volume de l'hippocampe se modifie (Peirera et al., 2007 ; Erickson et al., 2011) ce qui montre un effet notable de l'exercice physique sur la structure même du système nerveux. Or, comme cela a été décrit dans la partie théorique (chapitre 3) le système nerveux central, et notamment le cortex préfrontal, se développent rapidement et constamment durant la petite enfance ce qui peut amener à penser que la motricité pourrait avoir un impact fort sur les performances cognitives des jeunes enfants.

L'étude de Schaefer et al. (2010) est l'une des rares à apporter des preuves

empiriques de l'augmentation du niveau d'activation disponible avec l'activité physique chez les enfants. Ainsi, les enfants de 9 et 11 ans, tout comme les adultes, ont de meilleures performances mémorielles quand ils marchent sur un tapis roulant à leur vitesse préférée plutôt que lorsqu'ils restent assis ou marchent à une vitesse imposée. Deakin, Starkes et Elliot (1988) avaient aussi précédemment montré que des enfants à partir de 8 ans étaient plus performants et rapides dans une tâche de détection visuelle lorsqu'ils marchaient que lorsqu'ils étaient statiques. Ces résultats indiquent que les enfants peuvent aussi bénéficier de l'effet de l'activité physique et augmenter leurs performances cognitives du fait de l'augmentation du niveau de vigilance attentionnelle. Pour cela, Li, Krampe et Bondar (2005) ont fait remarquer que la double-tâche inventée devait utiliser une tâche motrice reproduisant une situation de la vie quotidienne. Ainsi, une activité motrice automatisée comme la marche pourrait conduire à augmenter les performances mémorielles des jeunes enfants comme nous en avons émis l'hypothèse, laquelle sera testée dans l'étude rapportée ici. L'autre hypothèse émise était que la vision d'un indice relié au but de la tâche pourrait aider le jeune enfant à maintenir le but de la tâche en mémoire.

8.2. Maintien du but en mémoire chez le jeune enfant

Avoir un comportement orienté vers un but est complexe car cela nécessite de se représenter en mémoire le but à atteindre, de formuler à partir de celui-ci la planification des actions à entreprendre pour aboutir au but et bien sûr de maintenir en mémoire le but lui-même pour guider et réaliser les actions au moment approprié (Marcovitch et al., 2010). Selon Towse, Lewis et Knowles (2007), « la régulation [de la pensée et des actions] ne peut avoir lieu que lorsque des buts ou le plan d'actions sont représentés de façon suffisamment complète et forte » pour permettre leur accomplissement (p.321). Lorsque le sujet échoue à mener à bien le comportement attendu, alors même qu'il est en mesure de mener chacune de ces étapes, on parle de négligence du but, i.e. *goal neglect*, (Duncan, Emslie, Williams, Johnson & Freer, 1996 ; Duncan, 1995). En fait, le sujet échouerait dans la tâche car il échouerait à poursuivre le but même de l'activité. Il a d'ailleurs été avancé que les difficultés des enfants dans les épreuves de Stroop reflèteraient davantage l'échec à maintenir sur plusieurs essais le but de la tâche à effectuer que de supprimer des réponses basées sur la

tâche distractive (Bub, Masson, & Lalonde, 2006). Cela serait souvent dû à des défaillances momentanées de la MDT (Kane & Engle, 2003) et serait fortement en lien avec l'intelligence fluide et donc au fonctionnement du lobe frontal (Duncan, 1995). On sait par ailleurs que le développement neuronal du lobe frontal est particulièrement intense durant l'enfance. Ceci permet de comprendre, tout au moins en partie, pourquoi le maintien du but est difficile chez le jeune enfant, celui-ci étant aussi particulièrement lié à l'effort de contrôle que les enfants peuvent exercer.

La question est alors de savoir s'il est possible d'aider le jeune enfant à maintenir le but en mémoire durant la réalisation de l'action. Dans cette optique de recherche, l'utilisation d'indices visuels a largement été explorée par les études menées notamment avec le *Dimensional Change Card Sort*, i.e. DCCS, puis avec le DCCS avancé chez les enfants plus âgés. Ainsi, Zelazo, Frye et Rapus (1996) ont étudié comment les enfants de 3 ans réalisaient la tâche du DCCS. Dans cette tâche, les enfants disposent de deux boîtes sur lesquelles sont positionnées des images indiquant le tri à opérer (e.g. un rond bleu et un carré vert) et d'images colorées. Dans un premier, il est explicitement demandé aux sujets de trier les cartes selon l'un des deux critères (i.e. la couleur ou la forme) puis, après la réalisation de plusieurs tris, il est demandé verbalement aux sujets de trier cette fois les cartes selon l'autre critère. A 3 ans, les enfants réussissent à trier les formes selon chacun des critères indépendamment. Pourtant, après avoir réalisé l'un des tris sur plusieurs essais, ils ne réussissent pas à se désengager de la première règle de tri pour mettre en œuvre l'autre règle de tri. Il ne s'agit pas d'une difficulté à comprendre la règle de tri puisque les enfants sont capables, après avoir réalisé des tris erronés selon la deuxième règle, de correctement désigner du doigt l'endroit où placer l'image selon la seconde règle (Zelazo et al., 1996), mais aussi de juger de manière pertinente le tri de cartes opéré par une marionnette (Jacques, Zelazo, Kirkham & Semcesen, 1999), ou encore de verbaliser comment réaliser le tri (Kirkham, Cruess & Diamond, 2003 ; Towse, Redbond, Houston-Price & Cook, 2000). Ainsi, comme le définit Duncan (1995), les enfants négligent le but, c'est-à-dire qu'ils connaissent la réponse appropriée mais ne la mettent pas en œuvre. Chez les enfants plus âgés, les auteurs utilisent la méthodologie du DCCS avancé où la règle de tri n'est pas énoncée verbalement par l'expérimentateur, comme précédemment, mais indiquée par des indices arbitraires (e.g. la présence ou l'absence d'une étoile à côté de

l'objet à trier, ou l'épaisseur du trait bordant la carte à trier ; Carlson, 2005 ; Hongwanishkul, Happaney, Lee & Zelazo, 2005). Ainsi, l'étude de Chevalier et Blaye (2009) montre que les enfants de 5 à 6 ans sont plus enclins à réussir une tâche si les indices visuels associés au but de la tâche sont transparents plutôt qu'arbitraires. Là encore, ce résultat n'est pas lié à un problème de compréhension de la valeur de l'indice en lui-même car les enfants sont capables par ailleurs de montrer qu'ils ont compris et retenu ce que signifiait l'indice en répondant à des questions sur ces indices (e.g. Quel indice est-ce ?, A quel jeu cet indice renvoie-t-il ?). Par contre, durant l'exécution de la tâche, ils ont davantage de difficultés que leurs aînés à extraire le but de la tâche à partir de l'indice arbitraire et à se représenter le but durant l'exécution de la tâche. Ainsi, les auteurs suggèrent qu'un déficit à maintenir le but en mémoire explique en partie les faibles performances de réussite des enfants au DCCS avancé (Carlson, 2005 ; Hongwanishkul et al., 2005), la moitié des 5-6 ans échouant encore à cette tâche. Pour comprendre comment le maintien du but de la tâche ou de sa représentation peut influencer sur les performances mémorielles des jeunes enfants, il est nécessaire de décrire la genèse d'un comportement orienté vers un but au travers d'un modèle théorique.

Selon le modèle *Adaptive Character of Thought-Rational* (ACT-R, Anderson, 1983, 1993, 1996 ; Anderson & Lebiere, 1998) tout comportement orienté vers un but est le résultat de l'interaction entre les connaissances déclaratives et les connaissances procédurales, i.e. les règles de production. Cette interaction vise à produire un comportement afin d'atteindre le but stocké dans le module de but (Anderson, 2004). Les chunks, i.e. groupements de connaissances déclaratives, encoderaient la position des items dans une liste alors que les règles de production utiliseraient cette information positionnelle pour organiser et planifier le rappel sériel des items (Anderson & Matessa, 1997). Le module de but est celui qui permet au sujet de garder le fil de sa pensée, surtout en l'absence de stimuli externes qui pourraient l'aider à le faire. C'est cette dernière fonction qui semble particulièrement importante chez les jeunes enfants qui ont de faibles capacités de contrôle attentionnel et qui pourrait expliquer que le sujet semble oublier le but de la tâche. En effet, les résultats précédemment cités sur la négligence du but, montrent que les jeunes enfants ont des difficultés à maintenir le but de l'activité en mémoire, i.e. dans le module de but, ou à y accéder durant la réalisation de la tâche. D'autre part, ces études mettent en évidence

que les indices visuels ont un impact sur la capacité des enfants à réussir la tâche, c'est-à-dire à ne plus négliger le but de la tâche. Ainsi, le second objectif de l'étude présentée dans ce chapitre sera d'évaluer l'impact de la vision d'un indice relié au but de la tâche sur les performances de rappel des jeunes enfants.

8.3. Etudier l'impact de la motricité et de la vision d'un indice relié au but de la tâche

Les deux expériences rapportées dans ce chapitre avaient donc pour but de tester les deux hypothèses que nous avons émises précédemment pour expliquer le gain de performances des enfants de 5 ans dans le cas d'un rappel différé avec marche directe vers la marchande comparativement à la condition de délai vide ou de marche avec obstacles (cf. expérience 1). Il s'agissait de déterminer si ce gain était en lien avec la motricité même, par augmentation du niveau de vigilance, ou avec la vision d'un indice relié à la tâche durant l'activité motrice, lequel pourrait aider l'enfant à maintenir en mémoire le but de l'activité, ou encore à la somme de ces deux facteurs. Dans l'étude présentée ici, les enfants devaient à nouveau marcher jusqu'à la marchande afin de réaliser la tâche de rappel des fruits. Cette tâche mimait ainsi une situation de la vie quotidienne comme préconisé par Li et al. (2005), et était comme imbriquée dans la situation initiale qui était d'aller faire les courses, ce qui donnait du sens à la réalisation de cette tâche secondaire.

La première hypothèse était que la motricité avait un effet positif sur les performances de rappel en permettant d'augmenter le niveau d'éveil attentionnel disponible ou en le maintenant à un meilleur niveau grâce à la mise en œuvre motrice (Adam et al., 1997 ; Mc Morris et al., 1987). Pour cela, les deux expériences rapportées ci-après ont introduit une tâche secondaire motrice durant le délai imposé avant le rappel. On s'attendait ainsi à ce que les performances soient plus élevées dans le cas d'un rappel différé mettant en œuvre une activité motrice secondaire comparativement à un rappel différé étant une simple attente.

La deuxième hypothèse était que la vision d'un indice directement relié au but de la tâche, i.e. l'étal de la marchande, permettait de placer plus aisément le but de la tâche dans

le module de but, c'est-à-dire de faciliter son maintien. Cette aide au maintien du but permettrait de libérer de l'attention qui pourrait être alors engagée dans le maintien de l'information et, peut-être, permettrait de mettre en œuvre une stratégie de maintien de rafraîchissement de l'information pour éviter son déclin temporel (Barrouillet et al., 2007). Ainsi, dans les expériences 5 et 6 rapportées ci-après, la vision de l'étal de la marchande durant l'exécution de la tâche secondaire motrice a été manipulée. On s'attendait alors à ce que les performances de rappel soient plus élevées dans le cas où l'étal de la marchande était visible comparativement à lorsqu'il était hors de la vue des enfants.

Enfin, dans un souci de continuité avec les études rapportées précédemment, nous avons voulu savoir à quel point l'introduction de la tâche secondaire motrice permettait de contrecarrer l'oubli lié au temps qui passe. Ainsi, dans l'expérience 6, le délai avant rappel a été manipulé. Nous faisons l'hypothèse que les performances devraient décliner avec le temps si la tâche, par ses caractéristiques intrinsèques (i.e. vision du but et mise en œuvre d'une activité motrice), ne permettait pas la mise en œuvre d'une stratégie de maintien de l'information à court-terme.

Expérience 5

L'expérience 5 avait donc deux objectifs principaux issus des résultats inattendus obtenus dans l'expérience 1. En effet, les performances de rappel des enfants de 5 ans diminuaient dans le cas d'un rappel différé par rapport à un rappel immédiat, sauf lorsqu'une activité motrice consistant à marcher en ligne droite jusqu'à la marchande était introduite durant le délai de rétention. Ainsi, le premier objectif de l'expérience 5 était de tester l'effet de la mise en œuvre d'une activité motrice automatisée, i.e. marche directe, durant le délai de rétention, l'étude étant élargie à des enfants de 4 et 6 ans. Le deuxième objectif était de tester l'impact de la vision d'un indice relié sémantiquement au but de la tâche sur les performances de rappel.

Ainsi, dans l'expérience 5, des enfants de 4 à 6 ans ont « fait les courses comme maman » à l'identique de la tâche utilisée dans les expériences 1 à 3. Le rappel pouvait être immédiat ou différé de 4 secondes. Durant le délai de 4 secondes, les enfants devaient patienter jusqu'à l'ouverture du magasin, i.e. l'ouverture de la boîte, ou bien devaient mettre en œuvre une tâche secondaire motrice. Afin de tester l'impact de la présence d'un indice visuel sur les performances de rappel, les enfants marchaient droit en direction de l'étal de la marchande (i.e. en le voyant) ou marchaient indirectement vers l'étal de la marchande en contournant un plot (i.e. sans le voir). La mise en œuvre de la tâche secondaire motrice est originale dans notre étude puisque, à l'identique de ce qui a été proposé pour l'attente avant le rappel, la tâche secondaire prend du sens pour ces jeunes enfants. En effet, les enfants ne marchent pas parce qu'on leur demande de le faire, comme dans les études où les sujets marchaient sur un tapis roulant, mais bien parce qu'il est nécessaire de marcher pour réaliser la tâche demandée, i.e. pour rejoindre l'étal de la marchande où se trouvent les fruits à empiler dans le sac afin de reproduire la séquence modèle. En outre, l'introduction de la tâche secondaire n'impliquait pas de manipuler un autre set d'items que ceux de la tâche principale, ce qui limitait l'émergence de représentations qui auraient interféré avec les items à maintenir. Cette originalité permettait d'adapter la difficulté de la tâche aux jeunes enfants.

On s'attendait tout d'abord à ce que les performances de rappel augmentent avec l'âge. De plus, en prolongement des études précédentes sur le déclin l'oubli de l'information

au cours du temps, on s'attendait à ce que les performances de rappel soient supérieures dans le cas d'un rappel immédiat que dans le cas d'un rappel différé. En outre, on s'attendait à ce que le déclin soit similaire au travers de l'âge. Spécifiquement à cette expérience, on s'attendait ensuite à ce que les performances de rappel soient supérieures quand le sujet mettait en œuvre une activité motrice durant le délai de rétention plutôt que lorsqu'il restait statique, la mise en œuvre d'une activité motrice permettant d'augmenter le niveau d'éveil ou d'attention disponible chez le sujet (Adam et al., 1997). En outre, on s'attendait à ce que les performances de rappel soient supérieures lorsqu'un indice visuel était présent, i.e. marche directe vers la marchande, plutôt que lorsqu'il n'y avait pas d'indice visuel, i.e. marche indirecte. En effet, la vision de l'indice pourrait permettre au jeune enfant de placer plus aisément le but de la tâche dans le module de but (ACT-R, Anderson, 1983, 2004) libérant ainsi des ressources attentionnelles. Celles-ci pourraient alors être engagées sur le maintien des items et de leur ordre.

METHODE

Les participants

Quatre-vingt-seize enfants de maternelle âgés de 4 ans (32 enfants ; âge moyen 44 mois ; SD = 3,6 ; 13 garçons), 5 ans (32 enfants ; âge moyen de 57 mois, SD = 3,7 ; 18 garçons) et 6 ans (32 enfants ; âge moyen de 69 mois, SD = 3,6 ; 10 garçons) ont participé à l'expérience. Tous étaient francophones et aucun n'était daltonien. Les enfants ont été recrutés dans trois écoles rurales de Bourgogne. Les parents ont donné par écrit leur accord pour l'expérimentation.

Matériel et procédure

La procédure utilisée dans cette expérience différait peu de celle utilisée dans l'expérience 2. Les enfants devaient donc faire les courses comme maman. Pour cela, ils disposaient d'un sac en plastique transparent à l'identique de celui de l'expérimentateur. Ils disposaient également de fruits en plastique, i.e. 3, 4 ou 5 fruits pour les 4, 5 et 6 ans respectivement, disponibles dans la boîte à ouverture automatique.

Pour chaque enfant de 4 et 5 ans, un choix aléatoire a été réalisé pour déterminer les 3 ou 4 fruits à utiliser parmi les 5 fruits de l'expérience, i.e. banane, tomate, citron, raisin et orange. La procédure était la même que dans les expériences précédentes avec des essais de longueur croissante et 4 essais pour chaque quantité de fruits. Les enfants ont réalisé la tâche immédiatement après que le sac de l'expérimentateur ait été caché ou après un délai de 4 secondes. Ce délai était soit vide, les enfants attendant l'ouverture du magasin (i.e. l'ouverture de la boîte automatique) soit occupé par une tâche secondaire consistant à marcher jusqu'à l'épicerie pour prendre des fruits nécessaires et effectuer la tâche. Le trajet durait toujours 4 secondes, mais pouvait être direct, i.e. marcher tout droit à l'épicerie, ou être indirect, i.e. marcher en tournant autour d'un plot avant d'aller à l'épicerie. Notons que durant la marche indirecte, la marchande était hors de vue des enfants, i.e. cachée derrière un écran. Pour vérifier que les enfants ne pouvaient pas prendre les fruits avant que le délai de 4 secondes ne se soit écoulé, en marchant vite par exemple, nous avons utilisé notre boîte automatique à ouverture électronique et fixé le délai de l'ouverture à 4 secondes. Les enfants ont réalisé toutes les conditions de rappel : rappel immédiat, rappel différé simple, rappel différé avec indice (i.e. marcher droit à la marchande), rappel différé sans indice (i.e. marcher indirectement à la marchande et sans la voir). La figure 8.1 illustre les deux conditions expérimentales de rappel différé mettant en jeu la marche.

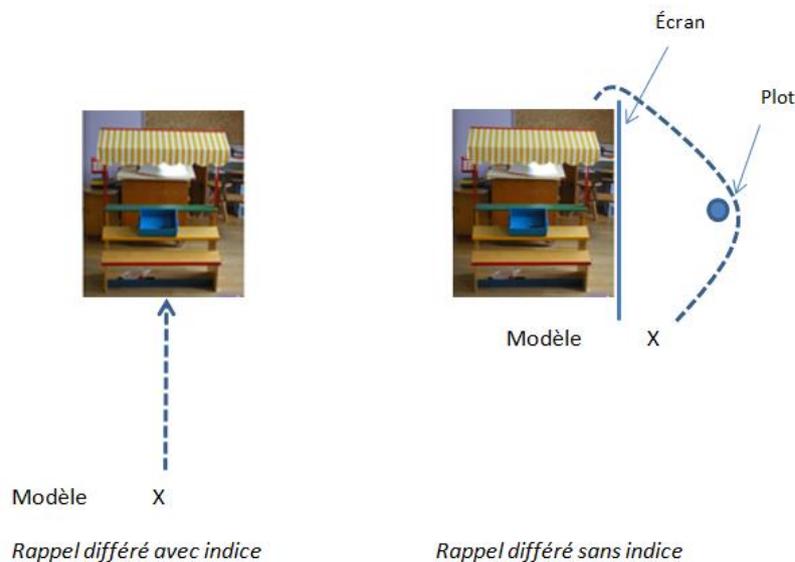


Figure 8.1 Mise en œuvre des conditions expérimentales de rappel introduisant une tâche secondaire motrice.

Un pré-test réalisé avec 2 enfants de chaque âge, enfants n'ayant pas participé par la

suite à l'étude, nous a permis de déterminer la distance à respecter entre l'expérimentateur et l'épicerie pour chaque groupe d'âge afin de respecter le délai de 4 secondes. Ainsi, les 4 ans ont eu à marcher quatre mètres pour atteindre directement l'épicerie, les 5 ans ont parcouru cinq mètres et les 6 ans 6 mètres. Le plot autour duquel les enfants ont marché a été posé à 1,5 mètre de l'écran cachant l'épicerie pour les 4 ans, 2 mètres pour les 5 ans et 2,5 mètres pour les 6 ans.

Pour éviter que la tâche ne soit trop longue et lasse les enfants, puisqu'ils passaient toutes les conditions de rappel, l'administration s'est déroulée sur deux sessions expérimentales comprenant chacune deux conditions de rappel. De plus, les conditions impliquant l'activité motrice pouvant être plus fatigantes, elles n'ont jamais été administrées durant la même session expérimentale. Un carré latin a ainsi permis de déterminer 16 ordres de passation. Deux enfants de chaque âge ont été aléatoirement affectés à chacun des ordres. La session expérimentale était précédée d'une phase d'apprentissage utilisant des cubes colorés, à l'identique des expériences 1 et 2. Notons que pour s'assurer d'une participation la plus effective possible de la part de ces jeunes enfants, il leur était annoncé avant le début des premiers essais qu'un bonbon aux fruits leur serait offert à l'issue des courses.

RESULTATS

Les résultats rapportés concernent 3 variables indépendantes. Tout d'abord, l'empan en mémoire calculé selon la méthode classique a été analysé. Puis, l'empan corrigé a été calculé et analysé pour tenir compte du différent rapport à la chance engendré par des quantités différentes de fruits à disposition selon les âges (i.e. 3 fruits à 4 ans, 4 fruits à 5 ans et 5 fruits à 6 ans). Enfin, l'écart entre les performances en rappel immédiat et entre chaque condition de rappel différé a été calculé et analysé pour observer la perte d'informations au travers du temps.

Etant donné que l'effet d'ordre de présentation des conditions expérimentales n'est jamais apparu comme étant significatif, ce facteur n'a pas été inclus dans les analyses suivantes, $ps > .15$, $ps_{BIC}(H_0|D) > .99$.

Empan en mémoire

Un empan en mémoire a été calculé en attribuant un quart de point pour chaque essai réussi dans chaque condition expérimentale de rappel, à l'identique de ce qui a été utilisé précédemment. Nous entendons par essai réussi que la séquence respecte les fruits utilisés ainsi que leur position initiale dans le sac.

Une ANOVA a été conduite sur l'empan moyen avec les conditions expérimentales de rappel (i.e. immédiat, différé simple, différé indicé, différé non indicé) comme facteur intra-sujet et l'âge (i.e. 4, 5 et 6 ans) comme facteur inter-sujets. Les performances augmentaient avec l'âge des sujets, $F(2, 93)=101.66$, $p<.0001$, $\eta^2=.69$. Ainsi, les performances de rappel des enfants de 4 ans (1.60) étaient inférieures à celles des enfants de 5 ans (2.42) elles-mêmes inférieures à celles des enfants de 6 ans (3.16), les contrastes menés a priori confirmant les différences significatives entre les groupes d'âge, $ps<.0001$. En outre, l'analyse révélait un effet simple de la condition expérimentale de rappel, $F(3, 279)=21.36$, $p<.0001$, $\eta^2=.19$. Notons que l'effet de la condition expérimentale ne s'exprimait pas de manière différente au travers des âges, l'interaction entre l'âge et les conditions de rappel n'étant pas significative, $F(6,279)=1.40$, $p=.21$, $\eta^2=.03$, $p_{BIC}(H_0|D)>.99$.

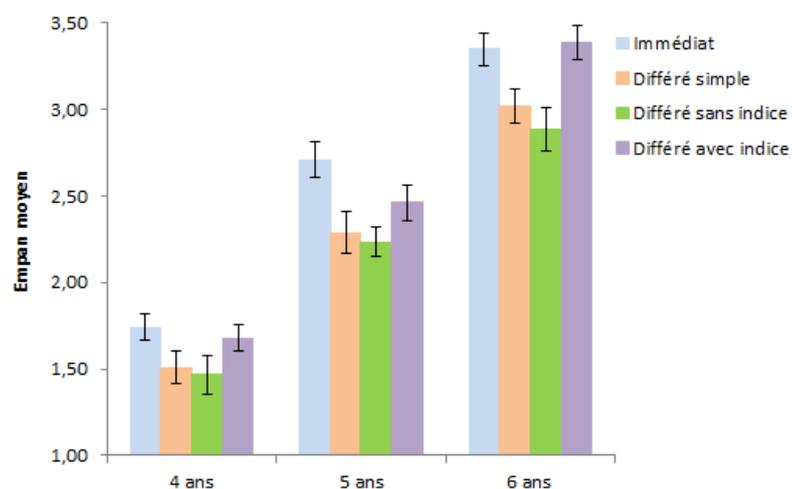


Figure 8.2 Empan moyen en fonction de l'âge (4, 5 et 6 ans) et de la condition expérimentale de rappel (Immédiat, différé simple, différé avec indice et différé sans indice). Les barres correspondent aux erreurs standards.

Nos prédictions ont été testées à partir de contrastes menés a priori. Conformément à nos attentes, les performances en rappel immédiat (2.60) étaient significativement supérieures aux performances obtenues globalement dans un rappel différé (2.33), $F(1,$

93)=42.79, $p<.0001$. De plus, contrairement à ce que nous avons prédit, les performances de rappel dans les tâches engageant une tâche secondaire motrice (2.35) n'étaient pas significativement supérieures aux performances en rappel différé simple (2.27), $F(1, 93)=2.08$, $p=.15$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.77$. Toutefois, cette absence d'effet reposait sur la différence existant entre les performances des deux conditions motrices. En effet, bien que les performances de rappel ne différaient pas entre les conditions en différé sans indice (2.27) et différé simple (2.20), les performances de rappel différé avec indice étaient supérieures au rappel différé simple, $F(1, 93)=1.5$, $p=.22$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.82$ et $F(1, 93)=14.65$, $p<.0003$ respectivement. Enfin, et conformément à nos attentes, le rappel différé avec indice conduit à de meilleures performances de rappel que le rappel différé sans indice, $F(1, 93)=27.07$, $p<.0001$. La vision d'un indice relié au but de la tâche menait à une augmentation des performances de rappel.

Comme l'illustre la figure 8.2, la condition de rappel immédiat et la condition de rappel différé avec indice montraient des performances très similaires (2.60 et 2.51 respectivement). Des analyses complémentaires menées à posteriori indiquent que les performances en rappel immédiat et en rappel différé avec indice ne différaient pas significativement, $p>.41$.

Empan corrigé

Un empan corrigé a été calculé en faisant la différence entre la performance réelle de l'enfant et celle qui aurait pu être obtenue par hasard. En effet, la tâche n'était pas équivalente aux trois âges, du fait que les enfants n'avaient pas la même quantité de fruits dans la boîte (3, 4 et 5 fruits à 4, 5 et 6 ans respectivement). Le rapport à la chance n'était donc pas identique. En appliquant la méthode déjà utilisée dans l'expérience 2 (page 115), l'empan pouvant être obtenu par hasard a été calculé. Il était de .67 à 4 ans, 0.42 à 5 ans et 0.28 à 6 ans.

Une analyse de variance similaire à celle réalisée sur l'empan moyen a été conduite sur les empan corrigés. Elle révèle les mêmes tendances que précédemment. Les enfants plus âgés ont rappelé davantage d'items (2.88) que les enfants de 5 ans (2.01) qui ont eux-

mêmes de meilleures performances de rappel que les plus jeunes (0.93), $F(2,93)=158.06$, $p<.0001$, $\eta^2 =.77$. Les contrastes menés a priori confirment la différence significative des performances des groupes d'âges pris deux à deux, $ps<.0001$. De plus, l'analyse révélait là encore un effet simple de la condition expérimentale, $F(3, 279)=21.36$, $p<.0001$, $\eta^2 =.19$. La condition expérimentale s'exprimait de manière similaire au travers de l'âge, l'interaction entre les deux facteurs n'étant pas significative, $F(6,279)=1.40$, $p=.21$, $\eta^2=.03$, $p_{BIC}(H0|D)>.99$.

En outre, les contrastes menés a priori confirmaient une supériorité des performances dans un rappel immédiat comparativement aux rappels différés, $F(1, 93)=42.79$, $p<.0001$. De plus, l'absence d'effet de la motricité sur les performances de rappel par rapport à un rappel différé simple reposait, là encore sur la différence entre les conditions motrices elles-mêmes, $F(1, 93)=2.08$, $p=.15$, $p_{BIC}(H0|D)>.77$. Ainsi, là encore, les conditions différées sans indice et simple ne différaient pas l'une de l'autre, alors que les performances étaient supérieures en rappel différé avec indice comparativement au rappel différé simple, $F(1, 93)=1.5$, $p=.22$, $p_{BIC}(H0|D)>.82$ et $F(1, 93)=14.65$, $p<.0003$. Enfin, les performances en rappel différé avec indice étaient supérieures à celles obtenues en rappel différé sans indice, $F(1, 93)=27.07$, $p<.0001$ (Figure 8.3).

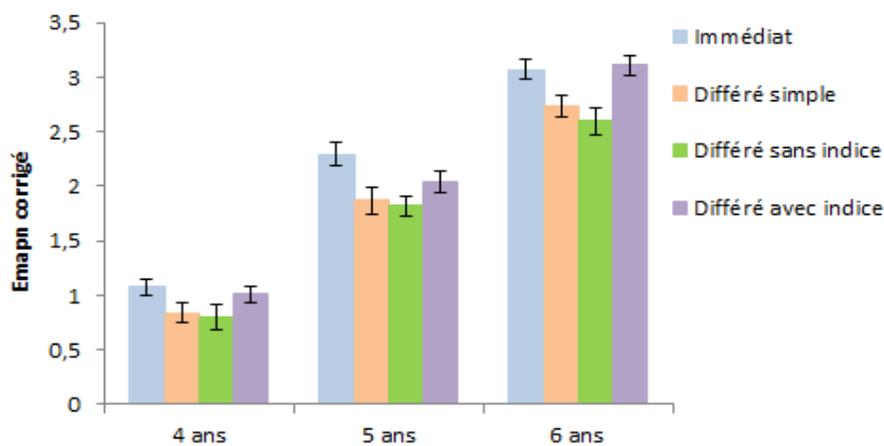


Figure 8.3. Empan corrigé en fonction de l'âge (4, 5 et 6 ans) et de la condition expérimentale de rappel (Immédiat, différé simple, différé indicé et différé non indicé). Les barres correspondent aux erreurs standards.

Enfin, comme le suggérait la Figure 8.3, les performances en rappel différé avec indice (2.05) et en rappel immédiat (2.15) semblaient similaires. Ce résultat était confirmé par des analyses complémentaires menées a posteriori, $p=.41$.

Différence avec le rappel immédiat

La différence entre l'empan corrigé en rappel immédiat et l'empan corrigé de chaque rappel différé a été calculée afin de rendre compte de la perte d'information moyenne, par rapport à un rappel immédiat, en fonction de la condition de rappel. Une ANOVA a ensuite été conduite sur la différence calculée, avec l'âge comme facteur inter-sujet (i.e. 4, 5 et 6 ans) et la condition de rappel comme facteur intra-sujet (i.e. différé simple, différé avec indice et différé sans indice). La différence observée entre le rappel immédiat et chaque condition différée ne variait pas avec l'âge, ce qui signifie que la perte d'information avec l'introduction d'un délai et la manipulation de la condition de rappel était équivalente au travers des trois groupes d'âges, $F(2, 93)=1.82$, $p=.17$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.94$. En revanche, la différence entre le rappel immédiat et les rappels différés variait avec la condition expérimentale de rappel, $F(2, 186)=13.97$, $p<.0001$, $\eta^2=.13$. Elle variait d'ailleurs de façon similaire au travers des âges, l'interaction entre les deux facteurs n'étant pas significative, $F(4, 186)=1.26$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.99$.

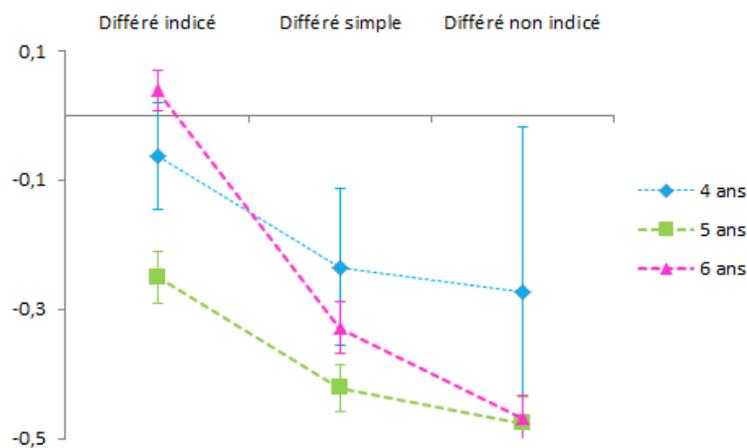


Figure 8.4. Empan corrigé proportionnel en fonction de la condition expérimentale de rappel (Différé indicé, Différé simple et Différé non indicé) et de l'âge (4, 5 et 6 ans). Les barres représentent l'erreur standard.

Plus précisément, les contrastes menés a priori montraient une absence d'effet de l'introduction d'une tâche motrice sur les performances de rappel, $F(1, 93)=2.08$, $p=.29$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.77$. Cette absence d'effet était à nouveau due au fait que les deux conditions motrices avaient des effets opposés. En effet, les conditions différées simple (-.33) et sans

indice (-.40) ne différaient pas l'une de l'autre, entraînant toutes deux des pertes d'informations équivalentes par rapport au rappel immédiat, $F(1, 93)=1.50$, $p=.22$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.82$. A l'opposé, la condition différée avec indice entraînait une perte d'information moindre (-.09) que la condition en différé simple (-.33), $F(1, 93)=14.65$, $p<.001$ respectivement. En outre, le contraste mené a priori entre les deux conditions motrices montraient que la perte d'information était inférieure dans le cas d'un rappel indicé (-.09) que dans le cas d'un rappel sans indice (-0.40), $F(1, 93)=27.07$, $p<.0001$.

Enfin, la Figure 8.4 indiquait que la perte d'information dans la condition motrice avec indice était proche de zéro, résultat confirmé par une analyse avec un t de Student, celui-ci montrant toutefois que les performances avaient tendance à être moins élevées en condition différée avec indice, $t(95)=-1.82$, $p=.07$.

Conclusion de l'étude 5

L'expérience 5 avait donc pour objectifs principaux de tester l'impact de l'introduction d'une tâche secondaire motrice et de la présence d'un indice visuel (i.e. l'étal de la marchande) sémantiquement relié à la tâche (i.e. rappeler les courses dans l'ordre) sur les performances de rappel. Au-delà de la réplication des résultats des études précédentes par la mise en évidence de l'augmentation des performances de rappel avec l'âge, de la diminution des performances au travers du temps, et de l'absence d'interaction entre l'âge et le délai de rétention, et ce pour toutes les variables prises en compte, l'expérience 5 permet de mettre en lumière deux résultats.

Le premier résultat était que, malgré l'augmentation des performances avec l'âge, le pattern de performances était similaire à tous les âges, c'est-à-dire que l'impact des différents facteurs manipulés, i.e. introduction d'une tâche secondaire motrice et vision d'un indice relié au but, était le même au travers des âges. En effet, il n'y avait pas d'interaction entre le facteur des conditions expérimentales de rappel et le facteur d'âge. Ainsi, comme dans les expériences précédentes, l'effet délétère de l'introduction d'un délai vide était identique à 4, 5 et 6 ans.

De la même façon, et c'est le deuxième résultat important de cette expérience, l'impact de l'introduction d'une tâche secondaire motrice avec indice visuel était similaire à tous les âges. Plus précisément, cette condition expérimentale entraînait des performances à la fois supérieures à un délai de rétention vide (i.e. différé simple), répliquant en cela les résultats de l'expérience 1, et similaires aux performances d'un rappel immédiat. C'est-à-dire que, malgré l'introduction d'un délai de rétention de quatre secondes, les performances de rappel ne diminuaient pas entre le rappel immédiat et cette condition en rappel différé. Cela pourrait aller dans le sens de notre hypothèse selon laquelle la marche en direction de la marchande, celle-ci étant visible, pourrait faciliter le maintien du but dans le module de but (Anderson, 1983, 2004), ou son accessibilité. Ainsi fait, des ressources attentionnelles seraient dégagées, ce qui permettrait l'obtention de meilleures performances de rappel, voire la mise en œuvre d'une stratégie de maintien de l'information en mémoire.

Toutefois, les autres résultats observés, comme celui de la supériorité des

performances en rappel différé avec indice comparativement à la condition différée sans indice visuel du but à atteindre, sont difficilement interprétables. En effet, si les deux conditions motrices différaient par la présence ou l'absence d'un indice visible relié au but de la tâche, elles variaient également par la complexité de la planification motrice associée à la mise en œuvre du comportement moteur. Dans la condition différée sans indice visuel, l'enfant devait contourner un plot, et donc réaliser un parcours circulaire, avant de se rendre à la marchande. Cette action demandait une planification motrice plus complexe que la marche directe, rectiligne, vers la marchande puisque le trajet à effectuer impliquait une rotation et la prise en compte d'un repère à contourner (i.e., plot). La complexité de la tâche motrice impliquait ainsi un contrôle attentionnel plus élevé (Jennings & van der Molen, 2005). Or, la planification motrice est sous contrôle du cortex prémoteur (D'Esposito, Ballard, Zahran & Aguirre, 2000) lequel est en pleine maturation entre 2 et 6 ans. En outre, plus la tâche motrice est complexe et plus elle est attentionnellement coûteuse (Picard & Strick, 1996) et longue à planifier avant sa mise en œuvre (Henry & Rogers, 1960). Enfin, la tâche secondaire motrice demandait l'inhibition du comportement moteur dominant, i.e. aller directement à la marchande pour prendre les fruits. Or, les jeunes enfants, du fait de la maturation du cortex préfrontal, ont des difficultés à inhiber des réponses dominantes (Livesay & Morgan, 1991 ; Diamond, Prevor, Callender, & Druin, 1997). Le modèle de partage temporel des ressources (i.e., TBRS, Barrouillet et al., 2004) suggère que lorsque deux activités doivent se dérouler conjointement, alors elles se partagent le pool commun de ressources attentionnelles, et ce, quelle que soit la nature des processus contrôlés en jeu et la nature des représentations qu'elles induisent (Barrouillet et al., 2007). Cette affirmation est fortement étayée par les études montrant que plusieurs fonctions exécutives telles que le switching attentionnel, la récupération en mémoire, la sélection de la réponse, l'inhibition ou encore la mise à jour des informations en mémoire interfèrent avec les activités de maintien de l'information en mémoire de travail (Liefoghe, Barrouillet, Vandierendonck & Camos, 2008). D'autre part, d'autres études ont montré que l'activité motrice pouvait interférer avec le maintien d'informations, comme les activités de pointage (Hale, Myerson, Rhee, Weiss, & Abrams, 1996), les mouvements des bras (Kirsch, Hennighausen, & Rösler, 2009 ; Lawrence, Myerson, Oonk, & Abrams, 2001; Quinn & Ralston, 1986), ou encore les mouvements des yeux (Lawrence et al., 2001; Postle, Idzikowski, Della Sala, Logie, &

Baddeley, 2006). De la même manière que les différentes fonctions exécutives et les différentes tâches motrices, en mobilisant de l'attention, interfèrent avec le maintien d'items en mémoire, la planification d'une activité motrice complexe aurait un effet néfaste sur la mémoire de travail. L'étude menée par Portrat et al. (2010) a en effet montré que les performances de rappel de lettres étaient affectées par l'intensité de la programmation motrice du geste utilisé pour répondre. Ainsi, les performances chutaient quand les sujets devaient donner leur réponse à la tâche secondaire (i.e. localisation de carrés en haut ou en bas de l'écran) en déplaçant leur main jusqu'au clavier pour appuyer sur la touche correspondante, comparativement à quand ils gardaient leurs index sur les touches et les pressaient pour répondre. Cette expérience confirmait que la planification motrice interférait avec le maintien d'un matériel verbal. Ainsi, dans l'expérience 5, il est légitime de penser que la condition motrice différée, où l'enfant devait contourner un plot pour se rendre à la marchande, impliquait une planification motrice plus importante qu'une simple marche linéaire et, par là-même, interférait avec le maintien des items à restituer, en mobilisant des ressources attentionnelles. Il n'est donc pas possible de conclure sur l'effet de l'absence d'indice visuel dans cette condition expérimentale puisque ce facteur était confondu avec la complexité de la tâche motrice.

Ainsi, dans l'expérience 6, les deux tâches motrices utilisées impliqueront une planification motrice tout à fait identique et seule la vision de l'indice relié au but de la tâche sera manipulée.

Expérience 6

L'expérience 6 avait donc pour objectif de tester spécifiquement la part de l'impact de la vision d'un indice visuel relié au but de la tâche d'une part et de la mise en œuvre d'une activité motrice d'autre part sur les performances de rappel. En effet, l'expérience 5 telle qu'elle était conçue n'a pas permis de conclure sur cette question. Ainsi, la vision d'un indice relié au but de la tâche était manipulée, l'indice étant présent ou absent du champ de vision de l'enfant durant la marche jusqu'à la marchande. Au contraire, la tâche motrice était identique dans toutes les conditions différées. D'autre part, la durée de rétention a été manipulée afin de voir l'évolution des performances de rappel en fonction du délai de rétention mais aussi des conditions de rappel.

Ainsi, quatre-vingt-seize enfants de 4, 5 et 6 ans ont eu à reproduire une séquence de fruits à l'identique du modèle réalisé par l'expérimentateur et ce, comme dans l'expérience précédente. Le rappel pouvait se faire immédiatement, ou après un délai court (i.e. 2 secondes) ou un délai long (i.e. 6 secondes). De plus, durant le délai de rétention, les enfants devaient engager une activité motrice. Afin de contrôler la demande attentionnelle de cette tâche motrice liée notamment à sa planification, les enfants ont effectué exactement la même tâche motrice : marcher droit vers l'étal de la marchande. Toutefois, l'étal de la marchande, qui représentait l'indice visuel relié au but de la tâche « faire les courses », était visible ou caché derrière un écran blanc. Cette fois, la tâche motrice était donc parfaitement similaire mais se déroulait sur un temps court ou long, l'indice relié au but de l'activité étant visible ou non durant la marche. Les sujets ont passé l'ensemble des cinq conditions expérimentales de rappel en deux sessions.

Dans la continuité du travail mené jusqu'à présent, on s'attendait à ce que les performances augmentent avec l'âge. On s'attendait également à ce que les performances en rappel immédiat soient supérieures aux performances en rappel différé, et que les performances après un délai court soient supérieures à celles après un délai long. En ce qui concerne les performances de rappel des conditions différées, la tâche secondaire mise en œuvre étant la même dans toutes les conditions différées, on s'attendait à ce que les performances de rappel soient similaires dans l'ensemble des conditions expérimentales de rappel différé si la mise en œuvre motrice était seule responsable de l'amélioration des

performances de rappel par rapport au rappel différé simple observé dans les expériences 1 et 5. A l'opposé, on s'attendait à ce que les performances de rappel soient supérieures quand un indice était visible comparativement à lorsqu'il était caché si la présence d'un indice visuel aidait au maintien du but de la tâche en mémoire.

METHODE

Les participants

Quatre-vingt-seize enfants de maternelle âgés de 4 ans (32 enfants ; âge moyen 43 mois ; SD = 3.1 ; 14 garçons), 5 ans (32 enfants ; âge moyen de 56 mois, SD = 3,7 ; 21 garçons) et 6 ans (32 enfants ; âge moyen de 68 mois, SD = 3,6 ; 16 garçons) ont participé à l'expérience. Tous étaient francophones et aucun n'était daltonien. Les enfants ont été recrutés dans quatre écoles rurales de Bourgogne. Les parents ont donné par écrit leur accord pour l'expérimentation.

Matériel et procédure

La procédure utilisait encore une fois la tâche de la marchande où l'enfant devait reproduire des séquences de fruits dans un sac transparent à l'identique du modèle réalisé par l'expérimentateur, en réalisant 2 essais par longueur de fruits. Cette fois, les enfants disposaient du même nombre de fruits dans la boîte, soit cinq fruits (i.e. tomate, banane, orange, raisin et citron). Le rapport à la chance était donc le même à tout âge. Ainsi, l'expérimentateur proposait des essais de longueur croissante pouvant aller jusqu'à 5 fruits. Comme la tâche était exactement la même pour tous les âges, les enfants disposant de la même quantité de distracteurs, et qu'elle était donc nécessairement plus difficile pour les enfants les plus jeunes, nous avons introduit une règle d'arrêt de la passation pour ne pas poursuivre la passation lorsque la tâche devenait trop ardue. Ainsi, les enfants étaient stoppés au sein d'une condition expérimentale après avoir échoué 3 items consécutifs. La condition expérimentale suivante était alors proposée.

Le rappel pouvait se faire immédiatement ou après un délai de rétention. Durant le

délai de rétention, l'enfant devait se rendre en marchant à l'étal de la marchande pour prendre les fruits et réaliser la tâche. Durant la marche, l'étal de la marchande pouvait être visible ou hors de la vue des enfants en étant dissimulé derrière un écran blanc. L'étal pouvait être peu éloigné de l'endroit où le modèle était montré, le délai de rétention étant alors bref, ou pouvait être plus éloigné, le délai nécessaire pour effectuer le trajet étant alors plus long. Afin d'éviter que les enfants ne prennent les fruits plus tôt que le temps initialement fixé, en marchant rapidement par exemple, la boîte à ouverture automatique contrôlée par un chronomètre électronique a été utilisée. L'ouverture de la boîte a ainsi été fixée à 2 secondes pour le délai court et 6 secondes pour le délai long. Les enfants ont réalisé les cinq conditions expérimentales de rappel illustrées dans la Figure 8.5 : rappel immédiat, rappel court avec indice visible, rappel long avec indice visible, rappel court avec indice caché et rappel long avec indice caché.

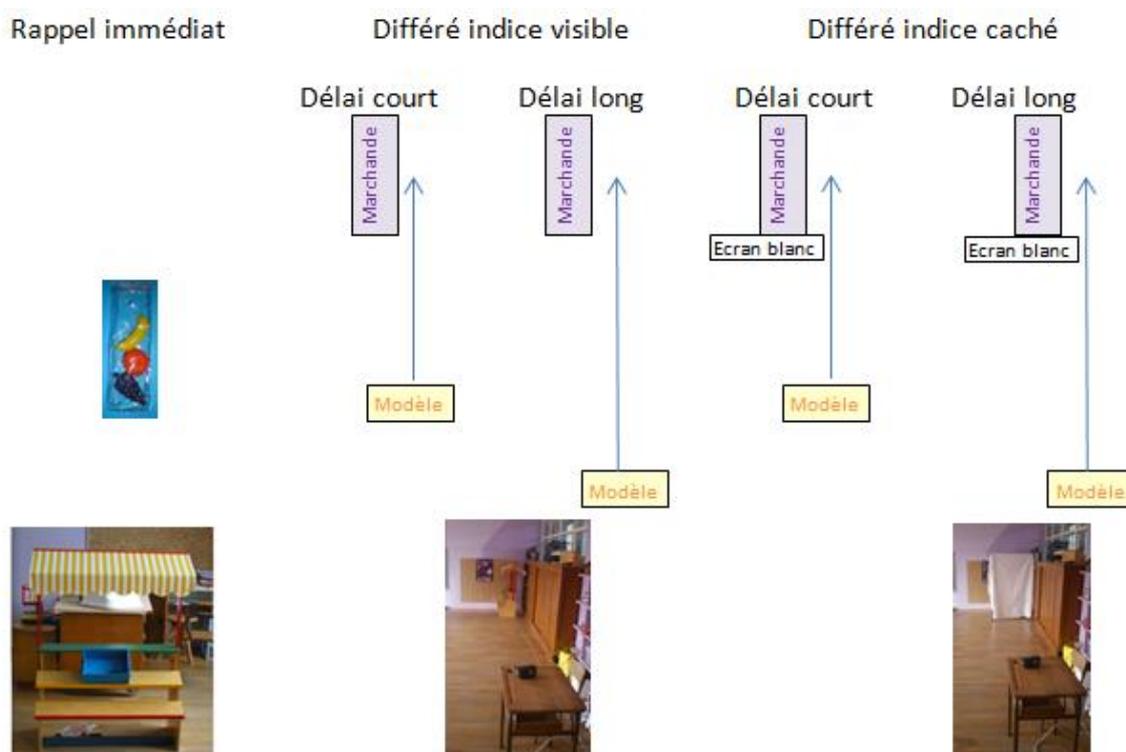


Figure 8.5. Illustration des 5 conditions expérimentales de rappel (immédiat, différé indicé court, différé indicé long, différé non indicé court, différé non indicé long).

Un prétest incluant 3 enfants de chaque groupe d'âge, enfants non inclus dans l'expérience 6 par la suite, a permis de déterminer les distances à utiliser afin de respecter

autant que possible les délais de 2 et 6 secondes pour parcourir la distance jusqu'à l'étal de la marchande. Le tableau 8.1 rapporte ces distances pour chaque âge et chaque condition de rappel différé.

Tableau 8.1 : Distances entre le modèle et l'étal de la marchande en fonction de l'âge (4, 5 et 6 ans) et de la condition expérimentale de rappel différé (rappel court vs rappel long).

	Délai court	Délai long
4 ans	1 mètre 70 centimètres	5 mètres 20 centimètres
5 ans	2 mètres 10 centimètres	5 mètres 60 centimètres
6 ans	2 mètres 50 centimètres	6 mètres

Pour éviter que la fatigue n'impacte négativement les performances de rappel, les 5 conditions de rappel ont été administrées en 2 sessions expérimentales à environ une semaine d'intervalle. Chaque session comprenait donc 2 conditions différées seules ou bien deux conditions différées accompagnées de la condition de rappel immédiat. Pour une question d'organisation pratique, chaque session comprenait soit les deux conditions différées avec indice visible ensemble, soit les deux conditions différées avec indice caché ensemble. Trente-deux ordres de passation distincts ont donc été définis grâce à un carré latin. Un enfant de chaque groupe d'âge a été aléatoirement assigné à chaque ordre de passation.

A l'identique des procédures des expériences 1, 2, 3 et 5, une phase d'entraînement utilisant des cubes de couleurs a été administrée préalablement pour s'assurer de la bonne compréhension de la tâche, et notamment de l'importance du respect de l'ordre d'introduction des fruits. Afin de motiver les jeunes enfants à réaliser la tâche avec application, ils étaient informés qu'ils auraient un bonbon au fruit à l'issue de la tâche des courses.

RESULTATS

Durant le prétest qui a servi à déterminer la distance à utiliser pour respecter au maximum les délais court et long, une grande variabilité a été observée dans les distances parcourues. Cette variabilité est apparue aussi bien entre les enfants d'un même âge que pour un même enfant entre ses différents essais. Ainsi, un sous-échantillon de 10 enfants

par âge a été chronométré durant la passation de l'expérience, et ce, pour chaque condition expérimentale. L'analyse des résultats débutera donc par l'analyse des temps chronométrés pour chaque groupe d'âge et chaque condition expérimentale de rappel afin de vérifier que les délais effectifs de rétention correspondaient à ce qui avait été déterminé, soit 2 et 6 secondes. Ensuite, du fait que cette première analyse a montré que le délai de rétention n'était pas équivalent entre les deux conditions de délai court (i.e. indice visible vs caché), les résultats ont été analysés soit en tenant compte du délai effectif de rétention de l'information, soit en testant l'hypothèse de la visibilité d'un indice relié au but de la tâche uniquement sur les conditions de rétention longues. Tout d'abord, une analyse a été menée sur l'empan en mémoire en tenant compte du délai de rétention de l'information. Ensuite, l'analyse a porté sur les performances d'empan puis sur la différence de performance entre chaque condition expérimentale de rappel et le rappel immédiat. Pour ces deux dernières analyses, l'effet de la visibilité de l'indice relié au but de la tâche n'a été analysé que dans le cas d'un délai de rétention long, les deux conditions en délai court n'étant pas équivalentes au niveau du délai de rétention. L'effet d'ordre n'étant pas significatif, il n'a pas été introduit dans les analyses suivantes, $p > .33$.

Analyse du temps effectif pour se rendre à l'étal

Ainsi, dix sujets tirés au hasard dans chaque groupe d'âge, ont été chronométrés sur les deuxième, troisième et quatrième essais de chaque condition de rappel différé afin de comparer globalement le temps qui leur était nécessaire pour atteindre l'étal de la marchande, et ce dans chaque condition de rappel différé (Tableau 8.2).

Tableau 8.2. Temps en secondes nécessaire pour atteindre l'étal de la marchande en fonction de l'âge (4, 5 et 6 ans), du délai avant rappel (court vs long) et de la présence d'un indice visuel (visible vs caché). Les écarts-types sont indiqués entre parenthèses.

	Délai court		Délai long	
	Indice visible	Indice caché	Indice visible	Indice caché
4 ans	3.81 (0.69)	2.44 (1.10)	5.46 (1.95)	5.73 (1.70)
5 ans	3.40 (0.68)	2.14 (0.64)	4.67 (1.39)	4.72 (1.29)
6 ans	3.43 (0.62)	2.17 (0.68)	5.94 (1.83)	5.33 (1.18)

Une ANOVA a été conduite sur le temps effectivement mis par les enfants pour atteindre l'étal de la marchande avec l'âge (i.e. 4, 5 et 6 ans) comme facteur inter-sujet, la

condition de rappel (i.e. délai court vs long) et la présence d'un indice visuel (i.e. visible vs caché) comme facteurs intra-sujets. Les enfants des différents âges marchaient un temps équivalent pour se rendre à la marchande, l'effet de l'âge n'étant pas significatif, $F(2,26)=1.29$, $p=.29$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.88$. De plus, les enfants marchaient effectivement plus longtemps dans la condition de délai long (5.80 secondes) que dans le délai court (2.90 secondes), $F(1,26)=34.23$, $p<.0001$, $\eta^2=0.57$. L'effet de la condition de rappel (i.e. délai court vs long) était d'ailleurs équivalent au travers des âges, l'interaction n'étant pas significative, $F<1$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.91$. En outre, les enfants ont marché significativement plus rapidement lorsque l'indice était caché (3.76 secondes) que lorsqu'il était visible (4.45 secondes), $F(1,26)=219.64$, $p<.0001$, $\eta^2=0.89$. L'interaction entre la condition de rappel et la présence d'un indice visuel était significative, révélant par-là que le délai nécessaire pour se rendre à la marchande n'était pas équivalent entre les deux conditions différées (i.e. indice visible vs caché), $F(1,26)=21.47$, $p<.0001$, $\eta^2=0.45$. Cette interaction était similaire au travers des âges, l'interaction entre les trois facteurs n'étant pas significative, $F<1$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.93$.

Ainsi, pour analyser plus avant l'origine de cette interaction entre la visibilité du but et la condition de rappel (i.e. court vs long) sur le temps nécessaire pour se rendre à la marchande, l'effet de la visibilité de l'indice a été analysé pour chacun des délais imposés avant rappel. L'ANOVA menée sur les délais courts a révélé qu'il n'y avait pas d'effet d'âge mais que les temps mis pour se rendre à la marchande étaient inférieurs lorsque l'indice était caché comparativement à lorsqu'il était visible, $F<1$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.92$ et $F(1,25)=111.29$, $p<.0001$, $\eta^2=.82$ respectivement. Par contre, l'ANOVA menée sur les délais longs montrait que l'âge et la visibilité de l'indice n'avaient pas d'impact sur les temps mis pour se rendre à la marchande, $F(2,26)=1.89$, $p=.17$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.81$ et $F<1$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.83$ respectivement. En conclusion, on peut dire que les enfants ont marché significativement plus rapidement quand l'indice était caché que lorsqu'il était visible mais ce, uniquement dans la condition de délai court. Dans la condition de délai long, le temps nécessaire pour se rendre à la marchande était similaire, que la marchande soit visible ou cachée.

Concrètement, dans le cas du délai court, le temps pour se rendre à la marchande était supérieur à deux secondes. Ainsi, les enfants pouvaient prendre les fruits et réaliser la tâche dès qu'ils arrivaient à la marchande puisque la boîte à ouverture électronique s'était

ouverte au bout de 2 secondes. Ainsi, les enfants pouvaient prendre les fruits plus rapidement dans la condition où l'indice était caché (i.e. 2.25 secondes) puisqu'ils avaient tendance à marcher plus rapidement que lorsque la marchande était visible (i.e. 3.55 secondes). La présence de ces variables confondues rendait impossible l'analyse de l'effet de la visibilité de l'indice dans la condition de délai court, à moins de tenir compte de la différence du délai de rétention entre les deux conditions en délai court.

Ainsi, l'analyse des résultats s'est poursuivie sous deux angles. Dans un premier temps, les résultats en termes d'empan ont été analysés après avoir été reportés sur un graphique tenant compte des délais de rétention effectifs de l'information. Dans un deuxième temps, et puisque le temps nécessaire pour aller à la marchande était équivalent que l'indice soit visuel ou caché dans la condition de délai de rétention long, les résultats en termes d'empan puis en termes de différence avec le rappel immédiat ont été analysés. Nos hypothèses concernant l'effet de la visibilité du but n'ont alors été testées qu'au travers des résultats des conditions de rappel après un délai long.

Analyse de l'empan en tenant compte du délai effectif de rétention

Afin de tenir compte du délai effectif de rétention, les empans moyens ont été représentés sur un graphique tenant compte de l'âge mais aussi du délai écoulé avant réponse, et ce en fonction du groupe d'âge (Figure 8.6). Dans le cas du délai long, le délai de marche n'a pas été pris en compte. En effet, bien que le temps mis pour se rendre à la marchande fût inférieur à 6 secondes, les enfants ne pouvaient pas prendre les fruits avant 6 secondes, du fait que la boîte à ouverture électronique n'était pas encore ouverte. Le délai de rétention était donc bien de 6 secondes dans cette condition.

Les droites de régression linéaire ont été calculées pour chaque âge. Les valeurs élevées des coefficients de détermination montraient que les performances se situaient, pour chaque groupe d'âge, au voisinage proche de ces lignes (Figure 8.6). Une première analyse, menée avec un t de Student, montrait que les pentes individuelles de régression différaient de 0, $t(95)=-5.19$, $p<.0001$. Ce résultat confirmait une diminution des

performances de rappel au cours du temps.

D'autre part, les pentes moyennes de régression semblaient être très proches les unes des autres (-.06, -.08 et -.09 à 4, 5 et 6 ans respectivement). Une ANOVA conduite sur les pentes de régression individuelles avec l'âge comme facteur inter-sujet montrait une absence de l'effet d'âge, $F < 1$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D) > .98$. Ainsi, la vitesse de déclin des performances était similaire au travers de l'âge entre 4 et 6 ans.

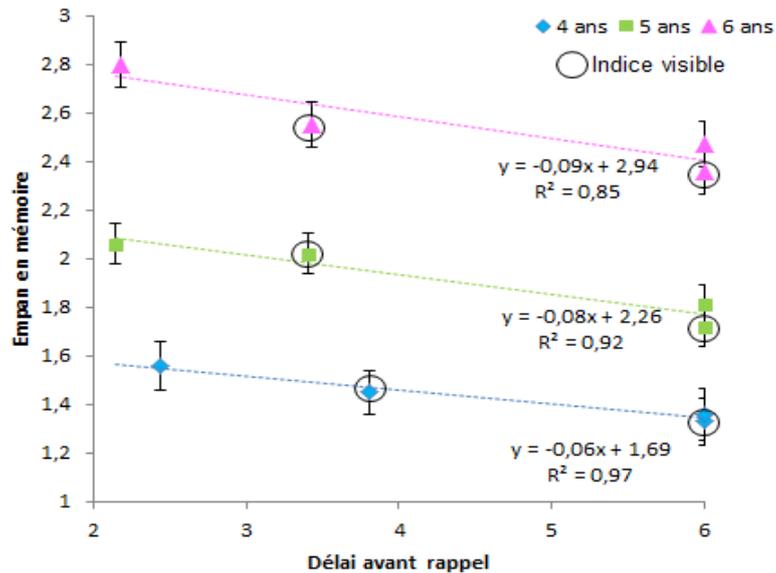


Figure 8.6. Empan moyen observé en fonction de l'âge (4, 5 et 6 ans), de la visibilité de l'indice (visible vs caché) et du délai écoulé avant rappel.

De la même manière, les valeurs de l'ordonnée à l'origine ont été calculées pour chaque enfant. A l'opposé des résultats obtenus sur les pentes de régression, les trois groupes d'âge différaient quant aux valeurs d'interception des droites avec l'origine (1.72, 2.36 et 2.97 à 4, 5 et 6 ans respectivement), $F(2,93)=18.72$, $p < .0001$, $\eta^2=0.29$. Les performances augmentaient donc avec l'âge, de .62 items en moyenne par an, $ps < .007$.

Analyse de l'empan dans le cas des délais longs

Comme dans les expériences précédentes, l'empan a été calculé en attribuant des points à chaque item réussi (i.e. items et ordre corrects). Du fait que les enfants réalisaient 2 essais par longueur de fruits, un demi-point a été attribué à chaque item réussi, et ce pour

chaque condition expérimentale de rappel. Une ANOVA a été réalisée sur l'empan en mémoire avec l'âge (4, 5 et 6 ans) comme facteur inter-sujet, le délai avant rappel (i.e. immédiat vs long) et la visibilité d'un indice (visible vs caché) comme facteurs intra-sujets. Les performances augmentaient avec l'âge, $F(2,93)=46.40$, $p<.0001$, $\eta^2=.50$ (Figure 8.7), ce qui a été confirmé par des contrastes menés a priori sur les âges pris deux à deux, $ps<.001$. De plus, la condition expérimentale influençait les performances de rappel, $F(1,93)=4.66$, $p<.01$, $\eta^2=.05$. Afin de tester nos prédictions, des contrastes a priori ont été réalisés. Les enfants rappelaient davantage d'items en rappel immédiat (2.01) qu'après un délai long (1.84), $F(1,93)=8.69$, $p<.005$. Ce déclin était similaire au travers des âges, l'interaction entre âge et délai n'étant pas significative, $F<1$, $p_{\text{BIC}}(\text{H0|D})>.85$. La présence d'un indice visuel relié au but de la tâche n'influçait pas les performances de rappel, $F(1,93)=1.20$, $p=.28$, $p_{\text{BIC}}(\text{H0|D})>.84$. Cette absence d'effet se retrouvait au travers des âges, $F<1$, $p_{\text{BIC}}(\text{H0|D})>.98$.

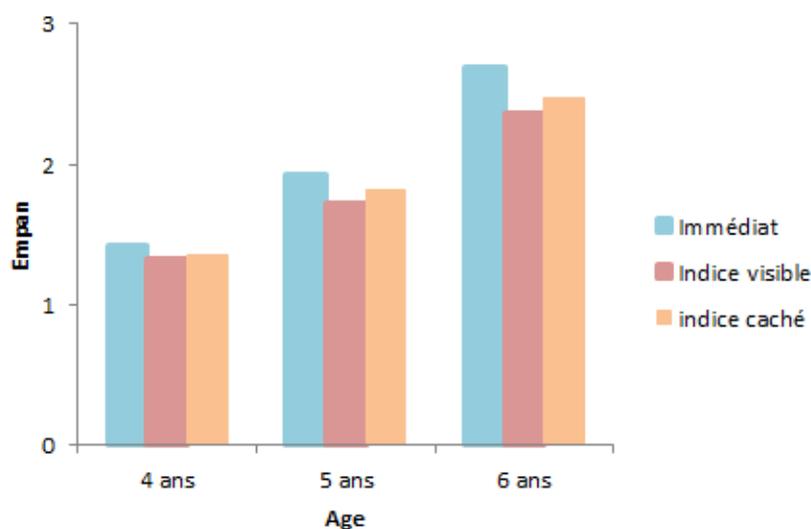


Figure 8.7. Empan en mémoire en fonction de l'âge (4, 5 et 6 ans), du délai avant rappel (immédiat vs long) et de la présence d'un indice visuel relié au but de la tâche (indice visible vs caché).

Les pentes individuelles de régression ont été calculées pour chacune des conditions de rappel long (indice visible vs caché). Une ANOVA conduite sur les pentes de régression linéaire avec l'âge (i.e., 4, 5 et 6 ans) comme facteur inter-sujet et la visibilité d'un indice (i.e. visible vs caché) comme facteur intra-sujet confirmait les résultats précédents. Les pentes étaient similaires dans les trois groupes d'âges (i.e. -.01, -.03 et -.05 à 4, 5 et 6 ans respectivement), $F<1$, $p_{\text{BIC}}(\text{H0|D})>.78$. De plus, elles ne variaient pas que l'indice soit visible ou caché, (i.e. -.03 et -.02 respectivement), $F(1,93)=1.20$, $p=.28$, $p_{\text{BIC}}(\text{H0|D})>.84$. La visibilité

d'un indice relié au but de la tâche et l'âge n'interagissaient pas, $F < 1$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D) > .99$.

Différence de performance entre les rappels différés et immédiat

Pour évaluer l'ampleur de la perte d'information au travers des différentes conditions expérimentales de rappel, la différence entre les performances en rappel immédiat en termes d'empan, et les performances de chaque condition différée de rappel d'autre part, a été calculée pour chaque enfant. Une ANOVA a ensuite été conduite avec l'âge (i.e. 4, 5 et 6 ans) comme facteur inter-sujet, la présence d'un indice visuel (i.e. visible vs caché) et le délai (i.e. court vs long) comme facteurs intra-sujets sur la différence de performances avec le rappel immédiat.

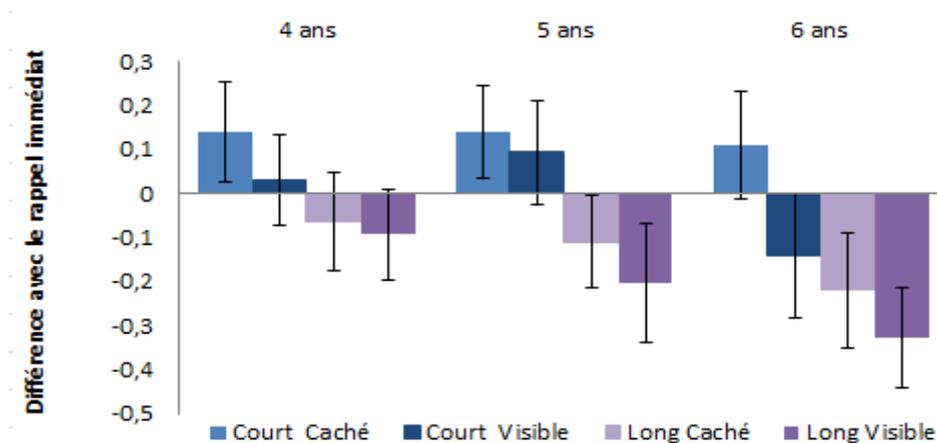


Figure 8.8. Différence de performances avec le rappel immédiat en fonction de l'âge (4, 5 et 6 ans), du délai (court vs long) et de la présence d'un indice visuel (visible vs caché).

Il apparaît que le pattern de différence avec le rappel immédiat est similaire dans les trois groupes d'âges, $F < 1$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D) > .98$. De plus, le délai influençait l'écart à la performance en rappel immédiat, $F(1,93)=21.99$, $p < .0001$, $\eta^2=0.19$. Ainsi, la perte d'informations par rapport aux performances en rappel immédiat était plus élevée dans le cas de délais longs (-.17) que dans le cas de délais courts (.06). L'influence du délai était d'ailleurs similaire au travers de l'âge, $F < 1$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D) > .98$. Notons que les résultats de chaque condition expérimentale de rappel ont été placés dans le graphique en tenant compte du délai effectif de rétention de l'information. Ainsi, la condition de rappel en délai court et indice caché était à gauche du graphique car c'est celle qui était effectuée après le délai de rétention le plus court (i.e., 2.25 secondes). Venait ensuite la condition de rappel en

délai court avec indice visible (i.e., 3.55) et enfin les deux conditions de délai long (i.e. 6 secondes de rétention pour chaque). Les performances de rappel différé semblaient être supérieures au rappel immédiat dans le cas du rappel effectué après le délai de rétention le plus court (i.e. 2.25). Ce résultat a été confirmé par un *t* de Student montrant des résultats significativement supérieurs à 0, $t(95)=-1.98$, $p<.05$. Par contre, les performances de rappel différé n'étaient pas différentes des performances en rappel immédiat lorsque le délai de rétention était de 3.55 secondes en moyenne, $t<1$. Enfin, les performances de rappel étaient inférieures aux performances en rappel immédiat dans le cas de délais longs que l'indice soit visible ou caché, $t(95)=-3.06$, $p<.01$ et $t(95)=-1.95$, $p<.05$.

En ce qui concernait l'impact de la visibilité d'un indice relié au but de la tâche à accomplir, l'analyse a donc porté uniquement sur les délais longs. La perte d'information semblait plus élevée dans le cas où l'indice était visible comparativement à lorsqu'il était caché. La différence entre les deux conditions expérimentales n'étaient toutefois pas significative, $F(1, 93)=1.20$, $p=.28$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.84$. Notons enfin que l'âge, le délai et la visibilité de l'indice n'interagissaient pas, prouvant là encore, un pattern identique au travers de l'âge, $F<1$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.99$.

Comme dans les analyses précédentes, les pentes de régression individuelles et les ordonnées à l'origine ont été calculées pour chaque sujet pour déterminer l'ampleur de l'oubli au cours du temps. Etant donné la différence de délai de rétention effectif déjà noté entre les conditions de délais courts, les valeurs en abscisse utilisées pour calculer ces valeurs reprenaient les délais de rétention moyens constatés pour chaque groupe d'âge et chaque condition différée (i.e. valeurs du Tableau 8.2), pour les délais courts uniquement. La valeur de 6 secondes a été utilisée pour les délais longs. L'ANOVA portant sur les pentes de régression d'une part et les ordonnées à l'origine d'autre part avec l'âge comme facteur intra-sujet montrait que l'âge n'affectait aucune des deux valeurs, $F_s<1$, $p_{\text{BIC}}(H_0|D)>.99$. Ces deux derniers résultats confirmaient ainsi une vitesse d'oubli de l'information similaire avec l'âge (i.e. $-.09$) et des pertes d'information par rapport au rappel immédiat équivalentes au travers de l'âge (i.e. -0.24).

Conclusion de l'étude 6

L'objectif de l'expérience 6 était donc de conclure quant à l'impact relatif de la mise en œuvre motrice (i.e. marche) d'une part, et de de la vision d'un indice relié au but de la tâche d'autre part, sur les performances de rappel. De plus, afin d'explorer plus avant l'effet bénéfique de la marche directe vers la marchande, le délai avant rappel a aussi été manipulé. Au-delà de la réplication des effets déjà observés dans les études précédentes, i.e. les performances de rappel augmentaient avec l'âge et diminuaient au cours du temps et ce de manière similaire au travers de l'âge, l'étude nous permet de pointer deux résultats principaux. Premièrement, la mise en œuvre motrice a un impact positif sur les performances de rappel des jeunes enfants. Deuxièmement, la présence d'un indice visuel n'a pas eu l'impact que nous imaginions sur les performances de rappel.

Ainsi, cette expérience nous a permis de confirmer l'effet positif de la marche sur les performances de rappel. En effet, en fonction du délai de rétention de l'information, les performances de rappel étaient soit supérieures à un rappel immédiat (i.e. 2.25 secondes), soit similaires à un rappel immédiat (i.e. 3.55 secondes) ou encore inférieures à un rappel immédiat (i.e. 6 secondes). Ainsi, les performances de rappel ont augmenté par rapport au rappel immédiat quand le rappel est intervenu après un temps de rétention très court, avant de diminuer avec le temps pour parvenir au niveau du rappel immédiat et enfin de décliner davantage pour être inférieur au rappel immédiat (i.e. rappels en différé long). La marche pourrait donc permettre l'augmentation du niveau d'éveil attentionnel disponible (Adam et al., 1997). Celui-ci serait mis au service du maintien des items, mais ne serait pas suffisant malgré tout pour permettre la mise en œuvre d'une stratégie de maintien efficace de l'information au fil du temps puisque les performances continuent de diminuer linéairement au cours du temps.

Ensuite, la présence d'un indice visuel n'a pas eu l'effet escompté sur les performances de rappel des jeunes enfants. En effet, lors du rappel différé long, les temps de marche étant équivalents, les performances de rappel n'étaient pas supérieures lorsque les enfants voyaient l'étal de la marchande tout en marchant que lorsqu'ils ne le voyaient pas. Ainsi, les performances de rappel semblaient ne dépendre que du délai s'étant écoulé

entre la présentation du modèle et la réalisation de la séquence par l'enfant, c'est-à-dire du délai de rétention de l'information. Les pentes de régression confirmaient d'ailleurs que le déclin était similaire dans les trois groupes d'âge. En outre, les valeurs élevées des coefficients de détermination des droites de régression attestaient que le déclin des performances au cours du temps suivait une décroissance linéaire. Ceci va bien dans le sens d'une dégradation des traces mémorielles au fil du temps (Barrouillet et al. 2007) ainsi que de l'absence de mise en œuvre spontanée de stratégie de maintien chez les jeunes enfants (Camos et Barrouillet, 2011).

En conclusion, l'expérience 6 a permis de mettre en évidence l'impact positif de la marche sur les performances de rappel d'une part et l'absence d'impact de la présence d'un indice visuel durant la marche d'autre part.

DISCUSSION

Les objectifs de cette étude étaient, de tester les deux hypothèses que nous avons émises suite à un résultat inattendu obtenu au cours de l'expérience 1. En effet, dans l'expérience 1, les sujets avaient à opérer un rappel immédiat ou un rappel différé de 5 secondes. Ce délai pouvait être vide, i.e. une simple attente, ou être occupé à la mise en œuvre d'une activité secondaire motrice, marcher jusqu'à la marchande, directement ou en passant sur deux plots. Il avait été mis en évidence que le rappel différé où l'enfant devait marcher directement jusqu'à la marchande permettait aux enfants de cinq ans d'obtenir des performances à la fois supérieures à celles obtenues lors d'un rappel différé simple (i.e. attente) et similaires à celles obtenues en rappel immédiat. Deux hypothèses avaient été émises pour expliquer ce résultat. La première hypothèse était que l'activité motrice en elle-même pouvait être facilitante en augmentant le niveau d'éveil neuronal disponible, conformément à Adam et al. (1997), c'est-à-dire en permettant au sujet de rester concentré sur la tâche, éveillé, par sa mise en activité. Ceci permettrait d'augmenter les ressources attentionnelles pouvant être engagées vers le maintien de l'information. Ainsi, marcher en direction de la marchande pourrait réunir les conditions de déclenchement d'une règle de production, conformément au modèle ACT-R d'Anderson (1983, 1993, 1996) s'apparentant à la mise en œuvre d'une stratégie de maintien de l'information. La deuxième hypothèse émise était que l'activité motrice dirigée vers la marchande avait l'avantage de diriger l'attention de l'enfant vers un indice visuel sémantiquement relié au but même de la tâche (i.e. maintenir les items et leur ordre pour faire les courses). Ce faisant, l'indice visuel faciliterait le maintien du but chez le jeune enfant et dégagerait ainsi des ressources attentionnelles pouvant être dévolues au maintien de l'information. Pour tester la première hypothèse, une tâche secondaire motrice, i.e. marcher jusqu'à l'étal, était introduite ou non durant le délai de rétention. Pour tester la seconde hypothèse, l'introduction d'un indice visuel relié sémantiquement à la tâche a été manipulée, l'étal de la marchande étant visible ou invisible durant la marche. Bien entendu, cette étude visait également à répliquer les effets obtenus précédemment à savoir l'augmentation des performances de rappel avec l'âge, le déclin des performances au cours du temps et l'absence d'interaction entre ces deux facteurs démontrant une vitesse d'oubli similaire de l'information entre 4 et 6 ans. Aussi, le

délai avant rappel a été manipulé. Au-delà de la réplication des effets mis en évidence dans les études précédentes, ces deux expériences ont permis de pointer deux résultats fondamentaux. Le premier effet est l'impact bénéfique de la mise en œuvre motrice sur les performances de rappel. Le deuxième est l'absence d'effet de la présence d'un indice visuel, durant la réalisation de la tâche secondaire motrice, sur les performances de rappel.

Tout d'abord, cette étude a donc permis de répliquer les résultats obtenus précédemment. Premièrement, ces deux expériences ont permis de mettre à nouveau en évidence le fait que les performances de rappel augmentent de 4 à 6 ans, l'écart étant supérieur à 1 point entre les âges extrêmes. Ceci était observé aussi bien au travers de l'augmentation développementale de l'empan qu'au travers de l'augmentation des ordonnées à l'origine des pentes de régression avec l'âge. Ce résultat confirme que notre paradigme évalue bien ce qu'il est censé évaluer, reproduisant les données de la littérature sur le domaine. L'augmentation développementale de l'empan est d'ailleurs la seule constante des études développementales menées sur le maintien à court-terme de l'information des jeunes enfants (voir Simmering & Perone, 2013, pour une revue de littérature). En effet, les valeurs même d'empans varient par ailleurs beaucoup en fonction des paradigmes, du type de matériel à stocker et/ou à traiter et des autres facteurs manipulés (Dempster, 1981; St Clair-Thompson, 2012).

Deuxièmement, les performances diminuent au cours du temps. En effet, au sein des expériences 5 et 6, les performances en rappel immédiat sont supérieures à celles des rappels différés et, au sein de l'expérience 6, les performances après un délai de rétention court sont supérieures aux performances après un délai de rétention long. Comme précédemment, la condition de rappel différé qui n'incluait pas de tâche secondaire, i.e. une simple attente, entraînait des performances de rappel inférieures à un rappel immédiat. Ainsi, entre 4 et 6 ans, l'augmentation du délai de rétention entraîne une diminution des performances de rappel et ce, même en l'absence d'une tâche secondaire.

Troisièmement, en plus d'une diminution des performances au cours du temps, le déclin était similaire au travers des trois groupes d'âges. En effet, les pentes moyennes de

régression ne différaient pas les unes des autres et le facteur d'âge n'interagissait pas avec le délai, comme dans les expériences précédentes. De la même manière, la perte d'information entre le rappel immédiat et les rappels différés était similaire au travers de l'âge. Ces derniers résultats confortent donc encore nos conclusions sur l'origine de l'oubli de l'information au cours du temps chez le jeune enfant. En effet, le déclin des performances observé ici, i.e. progressif, linéaire et similaire au travers de l'âge, s'accorde mal avec l'hypothèse de l'oubli lié aux interférences provoquées par les représentations émergent de la mise en œuvre d'une tâche secondaire (Lewandowsky et al., 2009). En effet, pour produire un tel effet sur les performances de rappel, la somme des interférences devrait être similaire aux travers de l'âge et de surcroît proportionnelle au temps qui s'écoule. A l'opposé, le déclin des performances, linéaire et similaire au travers de l'âge, est tout à fait en adéquation avec la théorie de l'effacement des traces mémorielles (Brown, 1958 ; Peterson & Peterson, 1959) ainsi qu'avec l'hypothèse des principaux modèles de la mémoire de travail selon laquelle les traces mémorielles s'effacent au cours du temps jusqu'à devenir inaccessibles si rien n'est fait pour les réactiver avant leur déclin complet (Baddeley, 1986; Barrouillet, Bernardin, Camos, 2004; Cowan, 1995). Ce résultat suggère en outre que le jeune enfant n'utilise pas de stratégie de maintien de l'information pour contrecarrer l'effet délétère du temps, et ce, même à 6 ans conformément à Camos et Barrouillet (2011). En effet, si les enfants plus grands avaient recouru à une stratégie de maintien de l'information, quelle qu'elle soit, la pente de déclin aurait diminué entre 4 et 6 ans, ce qui n'a pas été le cas ici, ni dans les expériences précédentes.

Au-delà de l'intérêt de la réplication même de nos précédents résultats, ce qui en augmente leur validité ainsi que la fiabilité de notre tâche, notre étude a permis de mettre en évidence deux résultats fondamentaux. Le premier résultat est l'effet bénéfique de la marche sur les performances de rappel. Le deuxième résultat est l'absence d'effet d'un indice visuel sur les performances de rappel.

Ainsi, le premier résultat nouveau que cette étude a permis de mettre en évidence est l'effet bénéfique de l'activité motrice sur les performances de rappel des jeunes enfants. Tout d'abord, la mise en œuvre de la marche directe vers la marchande a pu éviter la perte d'information liée habituellement à l'introduction d'un délai avant réponse (Barrouillet et al.

2007) en tous les cas pour des délais courts. Ainsi, dans l'expérience 5, comme observé dans l'expérience 1, les performances de rappel différé quand l'enfant marchait droit à l'étal de la marchande étaient à la fois similaires à celles en rappel immédiat et supérieures à celles en rappel différé simple (i.e. attente). Dans l'expérience 6, c'est le rappel qui s'est opéré au bout de trois secondes et demie environ (i.e. rappel différé court avec indice visuel) qui voyait des performances équivalentes à celles observées en rappel immédiat. En outre, un résultat très intéressant est que les performances de rappel dans le cas d'un délai plus court encore (i.e. environ 2 secondes dans le rappel différé sans indice visuel) ont été significativement supérieures aux performances en rappel immédiat. Ces résultats sont tout à fait congruents avec l'étude menée par Schaefer et al. (2010) où les auteurs montraient que des enfants de 9 ans avaient de meilleures performances de rappel dans une tâche d'empan inverse quand ils marchaient sur un tapis roulant à leur vitesse préférée plutôt que lorsqu'ils étaient assis. En fait, marcher ou plus généralement mettre en œuvre une activité physique pourrait aider les enfants à augmenter le niveau d'éveil neuronal disponible pour des tâches cognitives menées en parallèles (Adam et al., 1997; Collardeau et al., 2001; Deakin et al., 1988). Cela permettrait à ces jeunes enfants d'éviter l'ennui dû à l'introduction d'un délai en leur permettant de maintenir un niveau de vigilance optimale. Cet effet pourrait être particulièrement important chez ces jeunes enfants dont le contrôle attentionnel est encore fragile du fait de la maturation neuronale en cours (Hagen, 1967 ; Maccoby & Hagen, 1965 ; Harman & Fox, 1997 ; Rothbart & Posner, 2001). Notons en outre que dans l'expérience de Schaefer et al. (2010), l'augmentation des performances de rappel avait lieu uniquement quand les enfants marchaient à leur vitesse préférée, et non quand ils marchaient à une vitesse imposée. Or, dans notre étude, les enfants ont pu adopter la vitesse de marche qui leur convenait du fait qu'aucune instruction sur la vitesse n'avait été donnée, hormis celle de ne pas courir. Ainsi, conformément à Schaefer et al. (2010 ; mais aussi Adam et al., 1997; Collardeau et al. 2001; Deakin et al., 1988), marcher jusqu'à l'étal de la marchande, indépendamment qu'il soit visible ou caché, aiderait les enfants à augmenter leur éveil neuronal lequel pourrait alors être investi dans des tâches cognitives (Wagner & Goldin-Meadow, 2006).

Cependant, si la marche a permis ainsi de faire augmenter les performances dans des délais courts, elle n'a apparemment pas permis de libérer suffisamment d'attention pour

permettre la mise en œuvre durable d'une stratégie de maintien de l'information. Les performances de rappel ont donc décliné au cours du temps de manière linéaire. En effet, après un regain d'énergie attentionnelle permettant l'augmentation des performances de rappel deux secondes après que le modèle ait été caché, les performances de maintien deviennent équivalentes à un rappel immédiat au bout de trois secondes et demi à quatre secondes et sont, à six secondes de rétention, inférieures aux performances de rappel immédiat. Ainsi, les bonnes performances observées après un délai de rétention très court pourrait être le résultat de la mise en œuvre d'une stratégie de maintien de l'information rendue possible par le regain d'attention provoqué par la mise en œuvre motrice. Toutefois, si une stratégie de maintien a effectivement été mise en œuvre grâce à un regain de ressources attentionnelles, celles-ci n'ont pas été suffisantes pour assurer un fonctionnement durablement efficace de la stratégie de maintien, les performances ayant continué de décroître au fil du temps.

Le second résultat est que la présence d'un indice visuel (i.e. étal de la marchande) relié sémantiquement au but de la tâche (i.e. maintenir les items et leur ordre pour faire les courses) ne semble pas avoir eu d'effet bénéfique sur les performances de rappel. En effet, dans l'expérience 6, les performances de rappel ne différaient pas après un délai de rétention de six secondes que l'indice soit caché ou visible aux yeux de l'enfant. Il n'est pas possible de nous appuyer sur les résultats obtenus dans les conditions avec délai de rétention court, les enfants ayant marché globalement plus rapidement quand l'indice était caché, peut-être d'ailleurs par « peur » d'oublier le but de la tâche. Toutefois, la répartition des performances, opérée en tenant compte des temps de rétention, ne met pas en évidence de supériorité de la visibilité de l'indice, les performances se situant, selon de forts coefficients de détermination, aux alentours très proches d'une droite. Les performances semblent donc dépendre uniquement du délai de rétention de l'information avant rappel. L'absence d'effet bénéfique de l'indice visuel sur les performances va à l'encontre de notre hypothèse selon laquelle le fait de voir cet indice pourrait permettre aux jeunes enfants, qui ont des difficultés à maintenir le but de la tâche en mémoire, de placer plus aisément le but de la tâche dans le module de but selon le modèle ACT-R d'Anderson (1983, 1993, 1996). Cependant, on peut penser que nos deux conditions de rappel n'étaient pas si différentes

l'une de l'autre et que, finalement, le fait de voir réellement la marchande ne constituait pas un indice plus avantageux que de voir le drap blanc. En effet, du fait que la tâche a été réalisée dans de grandes pièces vides (i.e. des anciennes salles de classe), la présence du drap blanc devant la marchande matérialisait en quelque sorte l'emplacement de la marchande, voir la marchande elle-même. Ainsi, le fait de marcher vers l'endroit où il allait réaliser la tâche, même s'il ne voyait pas l'étal en lui-même, permettait peut-être à l'enfant de se représenter et de maintenir plus aisément le but de la tâche tel que décrit par Marcovitch et al. (2010). D'autre part, le fait de ne pas voir réellement l'endroit à atteindre, les enfants ont pu s'efforcer davantage de se le représenter pour ne pas l'oublier, ce qui aurait aidé alors à maintenir le but de la tâche secondairement. En effet, dans la tâche du DCCS avancé, Marcovitch, Boseovski, & Knapp, (2007) avait montré que lorsque la présentation de la tâche poussait l'enfant à se remettre ou à garder en mémoire le but de la tâche, les performances augmentaient. Cela pourrait expliquer la tendance observée dans la supériorité des performances en rappel différé long quand la marchande n'était pas visible. Toutefois, les performances tendaient seulement à être supérieures mais ne l'étaient pas. En conclusion, ce serait davantage la mise en mouvement vers le lieu où réaliser la tâche, i.e. la marche en direction de l'étal de la marchande, qui pourrait faciliter le maintien du but de la tâche dans le module de but. Ainsi, ce serait l'activité motrice en elle-même qui serait facilitatrice comme développé précédemment.

En conclusion de cette étude, on peut dire que même chez les jeunes enfants la mise en œuvre d'une activité motrice a un effet positif sur les performances de rappel différé, comme cela a pu être observé chez des enfants plus grands et des adultes dans des tâches mémorielles effectuées en simultané de la tâche motrice (Schaefer et al., 2013 ; Lödven et al. 2008 ; Schaefer et al., 2010). La marche dirigée vers le lieu où doit se réaliser la tâche aiderait l'enfant à se représenter et/ou à maintenir le but de la tâche en mémoire, i.e. dans le module de but, et ce indépendamment de la présence d'un indice visuel. Le fait d'être physiquement actifs pourrait aider les jeunes enfants à être cognitivement actifs. Toutefois, le regain d'attention en résultant n'est pas suffisant pour permettre aux jeunes enfants de mettre en œuvre une stratégie de maintien de l'information, ou alors pas de manière durablement efficace. Les traces mémorielles s'effacent alors progressivement avec le temps.

DISCUSSION GENERALE

9. Discussion Générale

Le but de ce travail de thèse était de récolter de nouvelles données afin d'améliorer notre compréhension du fonctionnement de la mémoire de travail chez le jeune enfant, soit entre 2 et 6 ans. En effet, comme cela a été expliqué plus avant, le maintien de l'information à court terme est largement étudié chez les nourrissons ou chez les enfants à partir de 7 ans, mais rarement dans la tranche d'âge explorée ici. Pourtant, il est avéré que l'augmentation des capacités en mémoire de travail est un facteur essentiel du développement cognitif (Case, 1985 ; Halford, 1993 ; Pascual-Leone, 1970 ; Barrouillet et Camos, 2007a pour une synthèse). La mémoire de travail est la clé de de tous les apprentissages fondamentaux se construisant durant la petite enfance, que ce soit pour permettre à l'enfant de s'adapter à son environnement (i.e. résoudre des comportements orientés vers des buts, Mosier & Rogoff, 1994 ; Willats, 1984, 1999 ; communiquer sur ses intentions par des gestes ou des mots, Bates, Beninni, Bretherton, Camaioni, & Volterra, 1979 ; Harding & Golinkoff, 1979 ; s'engager dans une attention partagée avec autrui, Bakeman & Adamson, 1984 ; Seibert, Hogan & Mundy, 1982) ou que ce soit pour lui permettre d'acquérir des compétences scolaires (Unsworth & Engle, 2007a ; Gathercole & Alloway, 2004, 2008). Le manque d'études dans cette tranche d'âge est certainement lié à l'absence de paradigme tout à fait adapté aux caractéristiques particulières de ces jeunes enfants. Ainsi, pour mener ce travail de thèse à bien, un nouveau paradigme, simple, présenté sous forme de jeu et rapide de passation a été créé, i.e. le paradigme de la marchande. Celui-ci a permis d'explorer plus précisément deux thèmes. Premièrement, la vitesse d'oubli de l'information a été explorée au travers de l'âge afin de déterminer si l'information est oubliée au cours du temps d'une part, et si la vitesse de l'oubli varie au cours du développement d'autre part, entre 2 et 6 ans. Deuxièmement, l'aide au maintien du but par l'introduction d'une tâche secondaire motrice et/ou par l'introduction d'un indice visuel relié sémantiquement au but de la tâche a été étudiée. L'idée sous-jacente était de tester si les caractéristiques intrinsèques de la tâche, en aidant au maintien du but dans le module de but tel que décrit dans le modèle ACT-R (Anderson, 2004), pouvaient amener l'enfant à utiliser précocement une stratégie de maintien de l'information. En effet, l'apparition de la répétition subvocale et du rafraîchissement attentionnel sont habituellement situées aux alentours de 7 ans. Chacune

des variables manipulées (i.e. délai de rétention, introduction d'une tâche secondaire motrice, vue d'un indice relié au but de la tâche) a été intégrée à la tâche elle-même (i.e. attente de l'ouverture du magasin ou attente du signal de départ de la course, marche jusqu'à l'étal de la marchande, vision ou non de l'étal durant la marche) pour lui donner du sens aux yeux des jeunes sujets. Ainsi, notre paradigme, tout en s'inspirant d'une méthodologie Brown-Peterson (Brown, 1958, Peterson & Peterson, 1959), s'éloignait des paradigmes habituels de laboratoire pour présenter une situation proche d'une situation de jeu, propice à aider ces jeunes enfants à rester attentifs durant la passation.

Fortes des données issues de la littérature, nous avons émis plusieurs hypothèses. Tout d'abord, nous avons émis l'hypothèse que les performances augmenteraient avec l'âge, ce qui a été vérifié. Nous avons également émis l'hypothèse que les performances s'amenuiseraient au fil du temps, hypothèse également vérifiée. D'autre part, les résultats ont révélé un élément important encore jamais mis en évidence dans cette tranche d'âge : la vitesse d'oubli de l'information était identique au travers de l'âge. Ensuite, suite à l'exploration menée dans l'étude 1 et les résultats qui ont été obtenus, nous avons émis l'hypothèse que les performances de rappel seraient supérieures dans le cas où l'enfant serait engagé dans une tâche secondaire motrice par rapport à une condition où il serait statique. Cette hypothèse a été partiellement confirmée. En effet, si la tâche motrice impliquait un contrôle attentionnel élevé (i.e., marche avec obstacle ou marche avec contournement) alors les performances de rappel étaient équivalentes à un rappel différé sans tâche secondaire. Par contre, si la tâche motrice impliquait un contrôle attentionnel modéré (i.e. marche directe à l'étal de la marchande), alors les performances de rappel étaient supérieures à un rappel différé sans tâche motrice. Un résultat inattendu révélait en outre que les performances de rappel avec mise en œuvre motrice impliquant un contrôle attentionnel modéré étaient similaires à un rappel immédiat quand le rappel intervenait après trois à quatre secondes de rétention et qu'elles étaient même supérieures à un rappel immédiat quand le délai de rétention était très court (i.e. deux secondes). Ainsi, une tâche motrice impliquant un contrôle attentionnel modéré participerait à aider l'enfant à maintenir l'information en mémoire, améliorant ainsi ses performances de rappel. Enfin, nous avons émis l'hypothèse, là encore suite à l'exploration menée dans la première étude, que la présence d'un indice visuel relié sémantiquement au but de la tâche améliorerait les

performances de rappel. Les résultats de l'expérience 6 ont révélé qu'il n'en était rien : la vision de l'indice n'a pas eu d'impact sur les performances de rappel des sujets.

Une constante observée durant notre étude a donc été l'augmentation progressive des performances de rappel avec l'âge. Après avoir précisé l'ampleur de cette augmentation développementale et l'avoir replacée dans la perspective des résultats décrits dans la littérature, la discussion s'orientera sur l'apport de cette thèse concernant deux domaines distincts. Ainsi, dans un premier temps, nous ferons le point sur ce que nous apprennent les données recueillies dans cette thèse sur l'origine de l'augmentation développementale de l'empan en mémoire de travail entre 2 et 6 ans, et ce, par rapport aux trois facteurs habituellement cités pour l'expliquer, i.e. modification de la vitesse de l'oubli de l'information au cours du temps, mise en œuvre de stratégies de maintien, augmentation du pool de ressources attentionnelles et/ou amélioration du contrôle attentionnel. Dans un deuxième temps, nous examinerons comment le contexte (i.e. les caractéristiques intrinsèques de la tâche) peut aider le jeune enfant à maintenir le but de la tâche en mémoire, soit en le plaçant dans une situation physiquement active (i.e. marche), soit en lui fournissant un indice visuel (i.e. étal de la marchande), et ainsi lui permettre de, peut-être, mettre en œuvre précocement une stratégie de maintien de l'information en mémoire.

Qu'elle que soit l'expérience concernée, les performances de rappel ont augmenté avec l'âge et ce, quelles que soient les variables dépendantes prises en considération. Ces résultats ont d'ailleurs été confortés par les ordonnées à l'origine des pentes de régression individuelles. Les performances d'un groupe d'âge donné étaient ainsi toujours significativement supérieures à celles du groupe d'âge plus jeune. La seule exception a été le manque de différence significative entre les performances des enfants de 2 ans et demi à 3 ans d'une part et de 3 ans à 3 ans et demi d'autre part, au sein de l'expérience 3. Toutefois, bien que ces deux groupes, très proches en âge, ne différaient pas significativement par leur valeur d'empan, des analyses complémentaires ont prouvé que les plus jeunes n'avaient pas pu traiter plus de 2 items, les performances à trois et quatre items ne différant pas du seuil du hasard. A l'opposé, trois items à traiter étaient à la portée des plus âgés, ceux-ci ayant des performances supérieures au seuil du hasard dans les essais à trois fruits. Ainsi, notre

paradigme s'est montré suffisamment sensible pour discriminer des enfants d'âge très proche.

Bien sûr, on pouvait remarquer que les valeurs d'empan obtenues par chaque groupe d'âge étaient différentes d'une expérience à l'autre, notamment en rappel immédiat. Toutefois, cette absence de constance dans la valeur d'empan au travers des expériences est un résultat classiquement connu dans la littérature, les paradigmes comme les caractéristiques des items manipulés entraînant des variations dans les capacités mémorielles mesurées (Dempster, 1981 ; St Clair-Thomson, 2012). Ainsi, chez nos plus jeunes sujets, de 2 ans à 2 ans et demi, l'empan en rappel immédiat était évalué à 1.23 items, alors qu'il était de 2.36 à 3.35 à 6 ans en fonction de l'expérience concernée. Il a été noté, dans la discussion de la deuxième étude, qu'au sein des trois expériences menées sur l'oubli de l'information au cours du temps, les valeurs d'empan variaient très régulièrement entre 4 et 6 ans. Ainsi, le gain d'empan moyen par an était de .445, .40 et .42, respectivement dans les études 2, 3 et 4. Il est important de noter que ce résultat n'a pas été retrouvé dans les deux autres expériences. Ainsi, les empan évalués en rappel immédiat augmentaient davantage entre 4 et 6 ans au sein des expériences 5 (i.e. .80 par an en moyenne) et 6 (i.e. .63 par an en moyenne). Ce résultat peut bien sûr être dû à des circonstances particulières, avec des enfants de 4 ans ayant des performances mémorielles globalement moins élevées que dans les expériences précédentes ainsi que des enfants de 6 ans ayant globalement des performances mémorielles plus élevées que leurs pairs du même âge des autres expériences. L'écart se creuserait alors entre les groupes extrêmes. Cette hypothèse ne peut être écartée mais une hypothèse alternative peut aussi être envisagée. Elle concerne le degré d'activité des enfants au sein même de chaque étude. En effet, au sein des expériences de l'étude sur l'oubli de l'information au cours du temps, les sujets étaient assis durant toute la durée de la passation puisque leur tâche consistait à rappeler les items immédiatement ou après un délai de rétention. Ils étaient donc physiquement très peu actifs. A l'opposé, dans les expériences de la troisième étude, les sujets se tenaient debout durant toute la passation, même pour le rappel immédiat. Durant les conditions de rappel différé, les sujets mettaient en œuvre une tâche secondaire motrice (i.e. marche). Du fait que la condition en rappel immédiat était toujours couplée à deux conditions différées, un enfant était de fait plus actif globalement dans la session expérimentale mettant en

œuvre le rappel immédiat qu'un pair du même âge ne l'avait été dans l'étude précédente. On pourrait penser que la marche, en rendant le sujet plus actif durant le temps de la passation, a aidé celui-ci à éviter l'ennui dû à une tâche plus passive (i.e. « j'observe, j'attends, je reproduis ») et l'a positionné dans un état d'éveil plus intense. La marche étant toutefois plus automatisée à 6 ans qu'à 4 ans, et peut-être aussi les plus jeunes se fatigant davantage de marcher, cet éveil aurait davantage profité aux enfants les plus grands. L'écart entre les performances des plus jeunes et celles des plus âgés se serait alors creusé. Bien sûr, seules des études complémentaires dont l'objectif serait de tester spécifiquement cette hypothèse pourraient nous apporter des éléments pour l'infirmier ou la confirmer.

En conclusion, l'augmentation développementale des performances de rappel, mise en évidence au sein de nos études, reproduit la seule constante des études menées sur les capacités mémorielles des jeunes enfants (voir Simmering & Perone, 2013, pour une revue de littérature). Les paradigmes que nous avons utilisés semblent donc bien mesurer ce qu'ils sont censés mesurer, i.e. les capacités mémorielles des jeunes enfants. En outre, ils se sont montrés suffisamment sensibles pour différencier les performances des enfants selon leur âge, même quand les groupes étaient très proches en âge (i.e. 6 mois d'écart). De ce fait, ces paradigmes sont adéquats pour obtenir des données utilisables pour la compréhension du fonctionnement du maintien à court terme du jeune enfant. Ainsi, les données recueillies vont permettre dans un premier temps de faire le point sur les facteurs pouvant expliquer l'amélioration développementale de l'empan entre 2 et 6 ans. Ensuite, ces données vont nous permettre d'évaluer l'impact de la motricité et de la vision d'un indice relié au but de la tâche sur l'aide au maintien du but qu'ils peuvent constituer chez les jeunes enfants.

9.1. Facteurs en jeu dans l'amélioration développementale de l'empan entre 2 et 6 ans.

Trois facteurs sont fréquemment avancés pour expliquer l'augmentation développementale des capacités mémorielles. Tout d'abord, la vitesse d'oubli de l'information est souvent citée comme le facteur le plus important dans les changements s'opérant avec le développement (Barrouillet & Gaillard, 2011 pour une revue). L'émergence

de stratégies de maintien de l'information ou l'amélioration de leur efficacité est un deuxième facteur permettant d'expliquer cette amélioration des compétences mémorielles (Flavell, 1969 ; Siegler, 1996). Enfin, l'augmentation du pool de ressources attentionnelles ou un meilleur contrôle de ces ressources attentionnelles a été un des premiers facteurs à être évoqué dans la littérature (Pascual-Leone, 1970). Que nous apprend spécifiquement ce travail de thèse sur la part de chacun de ces trois facteurs, dans l'augmentation développementale de l'empan observée entre 2 et 6 ans ?

9.1.1. Vitesse de l'oubli de l'information

Tout d'abord, les données recueillies dans cette thèse, et notamment durant la seconde étude portant exclusivement sur la vitesse de l'oubli de l'information, révèlent que le déclin de l'information est linéaire. En effet, les performances de chacun des groupes d'âge se répartissaient uniformément le long de droites de régression. Les coefficients de détermination très élevés (i.e. R^2 entre .90 et .99) attestaient d'une corrélation forte entre les deux facteurs. Ce pattern a aussi émergé dans les données de l'expérience 6 quand les performances de rappel étaient reportées sur un graphique tenant compte du délai de rétention avant réponse. Là, encore, les coefficients de détermination étaient élevés (i.e. .85 à .97). Ainsi, le déclin serait progressif et ne s'opèrerait pas anarchiquement mais linéairement. Or, selon Zhang et Luck (2009), le déclin de l'information maintenue à court terme se ferait progressivement ou alors d'un seul coup (Ferrel & Machleder, 1998 ; Lau & Bi, 2005). Chaque type de déclin renverrait d'ailleurs à un type particulier de fonctionnement du système selon des lois mathématiques et physiques. Ainsi, dans les systèmes pilotés par des feedbacks de l'environnement, et donc fonctionnant activement, la perte d'information surviendrait après le dépassement d'un certain seuil, comme un ordinateur qui s'arrêterait brutalement après une surchauffe. Au contraire, l'oubli graduel de l'information, la perte s'opérant linéairement, serait le reflet d'un système passif, comme celui de l'écho sonore d'une cloche. Ces auteurs ont ainsi mis en évidence chez les adultes, à l'aide d'une tâche évaluant la précision de représentations mémorielles visuelles, que les traces mémorielles pouvaient être maintenues plusieurs secondes sans souffrir d'une détérioration quant à leur précision puis disparaître soudainement. Ils concluaient ainsi que les traces mémorielles souffraient d'un déclin brutal car la mémoire de travail chez l'adulte est un système actif. Les

résultats de nos expériences, en montrant que le déclin de l'information est linéaire, vont dans le sens d'un maintien à court terme passif de l'information chez l'enfant de 2 à 6 ans, comme cela avait déjà été avancé par Camos et Barrouillet (2011). Cela ne signifie pas pour autant que le jeune enfant n'est pas capable de maintenir activement une information en mémoire, mais que précisément dans le contexte d'une tâche telle qu'elle avait été conçue ici, il opère un maintien passif. Ainsi, si le sujet n'opère pas activement de maintien de l'information, alors son attention erre et peut être sujette à des interférences de l'environnement ou du monde interne du sujet. Lewandowsky et al. (2009) défendent d'ailleurs l'idée que l'oubli des items à maintenir est le résultat des interférences entre les représentations des items à maintenir et celles des informations interférentes. Or, il est difficile de concevoir que la somme des interférences décrive très précisément un déclin linéaire. En outre, si les interférences étaient la cause première de l'oubli de l'information, alors les enfants plus âgés devraient oublier moins rapidement que les jeunes enfants car ils résisteraient mieux aux interférences que les plus jeunes, grâce à l'amélioration du contrôle inhibiteur résultant de la maturation neuronale (Diamond et al., 1997).

Or, et c'est le deuxième résultat clé de l'étude menée sur la vitesse d'oubli de l'information, la vitesse de déclin des performances était similaire au travers des âges, entre 2 et 6 ans. En effet, non seulement il n'y avait pas d'interaction entre les facteurs de délai et d'âge mais les pentes des droites de régression ne différaient pas non plus d'un âge à l'autre de 2 à 6 ans. Ceci a été observé aussi bien au travers des trois expériences menées spécifiquement sur l'oubli temporel qu'au sein de l'expérience 6, lorsque les performances étaient analysées en tenant compte du délai effectif de rétention. Ce résultat est particulièrement important car c'est la première fois qu'il est mis en évidence dans cette tranche d'âge. La constance de son apparition dans la deuxième étude et l'expérience 6 en augmente la robustesse. Ainsi, le déclin de l'information maintenue à court terme serait progressif et linéaire. En outre, il s'opère à vitesse constante entre 2 et 6 ans. La conséquence directe de ces résultats est qu'il n'est pas possible d'invoquer des modifications de la vitesse de déclin de l'information pour expliquer l'augmentation développementale de l'empan entre 2 et 6 ans.

Bien sûr, cela ne revient pas à dire que la vitesse de l'oubli de l'information ne se

modifie jamais durant le développement. Ainsi, de nombreuses études ont montré qu'il y avait une augmentation constante de la durée de rétention d'une information unique (i.e. une diminution constante du temps mis pour l'oublier) chez le nourrisson entre la première mesure possible de la mémoire de travail à 5-6 mois (Reznick et al., 2004) et la fin de la première année de vie (Diamond & Doar, 1989 ; Harris, 1973 ; Brody, 1981 ; Gilmore & Johnson, 1995). Cette augmentation constante des capacités mémorielles du jeune enfant, en termes de durée de rétention, est sans aucun doute liée à la maturation neuronale intense de la première année de vie (Bell & Fox, 1994) ainsi qu'à la spécialisation des aires cérébrales (Cuevas et al., 2012 ; Bell & Wolfe, 2007 ; voir Casey et al., 2005 pour une revue à partir des études en IRM). Cette amélioration pourrait être aussi à l'origine du développement particulièrement intense du premier système d'orientation de l'attention parmi les stimuli de l'environnement (Posner & Fan, 2004 ; Rothbart & Posner, 2001) lequel est mature au premier anniversaire de l'enfant (Colombo, 2001).

Concernant les sujets de plus de six ans et les adultes, les études menées sur cette thématique ne réussissent pas à déterminer si, oui ou non, la vitesse de déclin de l'information change avec le développement. Ainsi, certaines études mettent en évidence que les sons de tonalités différentes pourraient persister plus longtemps en mémoire avec l'âge, entre l'âge de 6-7 ans et l'âge adulte (Keller & Cowan, 1994). A l'opposé, au sein d'une même étude, les auteurs mettent en évidence que la vitesse de déclin de l'information reste inchangée entre 7 ans et 10 ans (Saults & Cowan, 1996, Expérience 1) ou bien que l'oubli est plus rapide chez les 7 ans que chez les 10 ans et les adultes. Enfin, plus récemment, Cowan, et al. (2000) ont montré à l'aide d'un paradigme, prenant en compte les capacités mémorielles moyennes des sujets selon leur âge, que la vitesse de déclin de l'information était identique dans les trois groupes d'âges observés (i.e. 8 et 11 ans, adultes). Toutefois, chez les adultes et les enfants après 7 ans, du propre aveu des auteurs, il est difficile de cerner ce qui est de l'ordre d'une modification de la vitesse de déclin de ce qui est de l'ordre de l'utilisation de stratégies de maintien de l'information en mémoire, les plus âgés pouvant utiliser des stratégies plus avancées que les plus jeunes (Cowan, Nugent, Elliott, & Saults, 2000).

En conclusion, l'information décline de manière linéaire au cours du temps. Ceci va

tout à fait dans le sens d'un déclin temporel de l'information tel que décrit par Baddeley (1986), Cowan (1999) et Barrouillet et al. (2004). Ainsi, même en l'absence d'interférence, le niveau d'activation des traces mémorielles décline lentement au cours du temps si rien n'est fait pour les réactiver. Si l'on ne peut nier que les jeunes sujets sont sujets aux interférences produites par l'environnement et leur monde intérieur, l'interférence ne jouerait qu'un rôle modéré, secondaire, dans l'oubli de l'information. En effet, le déclin temporel s'est opéré à la fois linéairement et de manière similaire à travers les âges, entre 2 et 6 ans. Une modification de la vitesse de déclin temporel n'est donc pas un facteur qui permet d'expliquer l'augmentation développementale de l'empan entre 2 et 6 ans. Par contre, la mise en œuvre de stratégie de maintien de l'information est un autre facteur potentiel pouvant être évoqué pour expliquer l'augmentation développementale de l'empan.

9.1.2. Mise en œuvre de stratégie de maintien de l'information

Il est admis que les deux principales stratégies de maintien de l'information sont la répétition subvocale et le rafraîchissement attentionnel. La répétition subvocale est un mécanisme de maintien spécifique de l'information verbale, qui permet de réactiver les traces mémorielles stockées sous forme phonologique via leur répétition cyclique interne. Le rafraîchissement attentionnel est, quant à lui, un mécanisme de maintien général, permettant de réactiver ou de reconstruire les traces mémorielles en les ciblant à travers le focus attentionnel. L'utilisation de l'un ou l'autre mécanisme permet donc de maintenir dans le temps les performances de rappel des items à maintenir par rapport à un rappel intervenu immédiatement après la présentation des items.

Dans toutes les expériences menées au sein de cette thèse comprenant un rappel immédiat et un rappel différé vide, i.e. non dévolu à la mise en œuvre d'une tâche secondaire, les performances en rappel immédiat étaient toujours supérieures à celles observées en rappel différé vide, et ce, à tous les âges. Ainsi, même en l'absence de tâche distractive, les sujets n'ont pas réussi à contrecarrer l'oubli dû au temps qui passe. Soit ils n'ont pas utilisé de stratégie de maintien, ou alors, celle qu'ils ont utilisée s'est révélée inefficace. D'ailleurs Wellman (1988) défend l'idée que les jeunes enfants utilisent des stratégies mais que celles-ci se révèlent souvent inefficaces. En tous les cas, nos résultats

concordent avec l'idée que la répétition subvocale et le rafraîchissement attentionnel ne pourraient être mis en œuvre par des enfants aussi jeunes que 6 ans (pour la répétition subvocale : Flavell, Beach, Chinsky, 1966 ; Ferguson, Bowey, & Tilley, 2002 ; Gathercole & Adams, 1993 ; Gathercole, Adams & Hitch, 1994 ; Jarrold, Cowan, Hewes & Riby, 2004 ; pour le rafraîchissement attentionnel : Barrouillet et al., 2009, Expérience 3 ; Baddeley, Gathercole & Papagno, 1998). Ils sont aussi en accord avec l'idée que les enfants avant 6 ans opéreraient un maintien passif de l'information (Camos & Barrouillet, 2011), c'est-à-dire que leurs performances ne dépendraient que du temps de rétention de l'information. Dans l'étude de Camos et Barrouillet (2011), les enfants étaient dans une situation de double tâche, i.e. maintenir le nom d'animaux et donner la couleur de smileys durant l'intervalle de rétention. Les performances des enfants de 7 ans avaient diminué avec la charge cognitive de la tâche secondaire, alors qu'à 6 ans elles n'avaient varié qu'avec la durée de la rétention des informations (i.e. la durée de la tâche secondaire). Les auteurs avaient alors argumenté que les enfants de 7 ans profitaient d'une faible charge cognitive pour alterner entre maintien et traitement durant même l'épisode de traitement, ce qu'ils ne pouvaient faire quand la charge cognitive augmentait et occupait toutes leurs ressources attentionnelles. A l'opposé, les enfants de 6 ans ne seraient pas en mesure d'alterner entre maintien et traitement durant l'épisode de traitement et verraient donc leurs performances diminuer durant la durée de rétention. Or, dans les expériences rapportées ici, le délai était vide et les enfants n'avaient donc pas à alterner entre maintien et traitement. Ils n'ont pour autant pas réussi à maintenir l'information grâce à un mécanisme, quel qu'il soit. D'autre part, Tam et al. (2010), à travers les résultats obtenus dans leurs deux expériences mettant en jeu des situations de double-tâche, suggèrent que les enfants dès 6 ans ont à leur disposition les deux mécanismes de maintien, même s'ils sont moins efficaces qu'à 8 ans. S'il en est ainsi, les performances des enfants de 6 ans devraient décliner moins rapidement que celles des enfants plus jeunes et ce d'autant plus que le délai était vide dans nos expériences. Un délai vide est en effet la condition la plus favorable pour que les jeunes enfants puissent opérer un mécanisme de maintien de l'information.

Or, et c'est un résultat fort de notre étude, l'oubli s'opérait de manière similaire au travers de l'âge entre 2 et 6 ans, l'interaction entre l'âge et le délai ne s'étant jamais révélée significative, et la possibilité d'une absence d'interaction étant confortée par le critère

d'information bayésien (Masson, 2011). D'autre part, les pentes des droites de régression linéaires étaient équivalentes d'un âge à l'autre. Si les enfants les plus âgés avaient mis en œuvre une stratégie de maintien de l'information, même sommaire, alors leurs performances auraient décliné moins vite que celles des enfants plus jeunes. Dans ce cas, la pente de déclin de leurs performances aurait dû être plus faible que celles des enfants plus jeunes, ce qui n'a pas été le cas.

Ainsi, les données recueillies dans cette thèse montrent une absence de mise en œuvre de mécanismes de maintien de l'information entre 2 et 6 ans. L'émergence de stratégie de maintien ou l'amélioration de leur efficacité ne sont donc pas des hypothèses permettant d'expliquer l'augmentation développementale de l'empan dans cette tranche d'âge. Bien sûr, plus tard dans l'enfance, l'augmentation développementale des capacités mémorielles est en lien avec une amélioration des stratégies de maintien de l'information (Barrouillet et al., 2009; Hitch & Halliday, 1983). Notamment, avec l'âge, la vitesse d'articulation augmente, celle-ci étant linéairement corrélée aux performances d'empan des sujets (Baddeley, Thomson & Buchanan, 1975). Cette augmentation de la vitesse d'articulation permet donc aux enfants de répéter de plus en plus rapidement les items à retenir et donc d'opérer une répétition subvocale beaucoup plus efficace. En effet, pendant un temps t , les enfants plus âgés vont pouvoir répéter plus d'items que les plus jeunes (Hitch & Halliday, 1983 ; Hulme et al., 1984). On ne manquera pas de noter toutefois que les enfants avant 7 ans ne montrent qu'un lien faible, voire inexistant, entre leur vitesse d'articulation et leur empan (Gathercole & Adams, 1993 ; Ferguson, Bowey & Tilley, 2002 ; Jarrold, Hewes & Baddeley, 2000 pour une mise en évidence d'une relation à 5 ans). D'ailleurs, la répétition subvocale est liée au discours intérieur et, le processus développemental d'internalisation du discours intérieur n'est pas complet avant le milieu de l'enfance (Vygotsky, 1962). Ainsi, les enfants avant 6 ans et a fortiori les enfants avant deux ans, ne pourraient accéder à la répétition subvocale (Henry, 1991a, 1991b). Concernant le rafraîchissement attentionnel, peu d'études ont exploré son fonctionnement au travers du développement. Barrouillet et al. (2009) ont toutefois mis en évidence qu'il apparaîtrait aux alentours de 7 ans et qu'il se développerait ensuite jusqu'à la fin de l'adolescence. L'efficacité croissante de ce processus pourrait être liée à l'augmentation de la vitesse de réactivation des items ciblés au travers du focus attentionnel (Bayliss et al., 2005 ; Hulme et

al., 1984 ; Cowan et al., 1994 ; 1998) mais aussi à l'augmentation des capacités attentionnelles et de contrôle attentionnel, comme nous allons le voir dans le point suivant.

Ainsi, nos données confirment que le maintien à court terme des informations est passif entre 2 et 6 ans. Les enfants ne réussissent pas à mettre en œuvre une stratégie efficace de maintien de l'information et les performances déclinent donc avec le temps. La similarité des pentes de déclin au travers des âges confirme que même les sujets les plus âgés, les 6 ans, n'utilisent pas de stratégie de maintien, ou alors de manière inefficace. Ce facteur ne peut donc pas expliquer l'augmentation développementale de l'empan entre 2 et 6 ans.

9.1.3. Augmentation des ressources attentionnelles / amélioration du contrôle attentionnel.

La quantité de ressources attentionnelles disponibles dans le système est un élément clé de chacun des modèles les plus influents de la mémoire de travail. Elle reflète soit le contrôle qui peut être exercé par le système attentionnel superviseur (Shallice, 1986) ou par le central exécutif sur les systèmes esclaves (Baddeley, 1986), soit la quantité d'énergie disponible pour activer les traces mémorielles (Cowan, 1999 ; Barrouillet et al., 2004), et pour exercer un contrôle attentionnel nécessaire à l'alternance entre stockage et traitement (Barrouillet et al., 2004). Dans les modèles généraux de la MDT, le système dispose d'un pool commun de ressources qui permet de gérer à la fois le maintien et le traitement des informations et ce, quelle que soit leur nature (Cowan, 1999 ; Barrouillet et al., 2004). A l'opposé, pour les modèles spécifiques, chaque sous-système, i.e. verbal vs visuo-spatial, disposerait de son propre pool de ressources pour maintenir les informations (Baddeley & Logie, 1999).

Or, dans les expériences menées avec introduction d'une tâche secondaire motrice, les performances diminuaient avec l'augmentation de la charge cognitive de la tâche secondaire. Dans les expériences 1 et 5, quand la tâche secondaire impliquait une planification motrice plus complexe et donc, cognitivement et attentionnellement plus coûteuse, alors les performances de rappel diminuaient. Ceci peut être interprété de deux façons. La première interprétation, faite dans le cadre d'un modèle général de MDT, est que la réalisation de la tâche secondaire et le stockage des items à maintenir se fait à partir d'un

même pool de ressources. Ainsi, si la charge attentionnelle de la tâche secondaire augmente, i.e. si les ressources attentionnelles nécessaires à sa réalisation augmentent, alors l'attention disponible pour le stockage des items diminue. Les performances de rappel chutent alors en conséquence. La deuxième interprétation possible, dans le cadre théorique d'un modèle spécifique, est que la planification motrice et le stockage des items à maintenir puisent dans le même pool de ressources parce que précisément les informations qu'elles impliquent sont de même nature, i.e. visuo-spatiales. Ceci est tout à fait possible étant donné que les enfants avant 7 ans utiliseraient préférentiellement un code visuel pour le maintien des informations plutôt qu'un code verbal. Ceci serait vrai même quand l'expérimentateur verbalise les items à maintenir (Hayes & Schultze, 1977) ou bien qu'il soit demandé aux enfants de le faire eux-mêmes durant la présentation (Hitch et al., 1988). Toutefois, le type d'encodage utilisé même s'il n'est pas verbal, varie qualitativement entre 2 et 6 ans. En effet, selon Palmer (2000) l'enfant de 3 ans n'aurait aucune stratégie de maintien de l'information, qu'elle soit visuelle ou verbale, ce qui serait dû à des capacités attentionnelles trop limitées, lesquelles seraient dépassées pour mettre en œuvre une stratégie quelconque (Guttentag, 1984). Ensuite, l'enfant utiliserait préférentiellement une stratégie d'encodage visuel de l'information vers 5 ans, avant d'utiliser à la fois un encodage visuel et phonologique à 6 ans. Enfin, les informations seraient chez les enfants plus grands et les adultes préférentiellement codées voire recodées à partir des informations visuelles pour être traitées exclusivement sur leur versant verbal. Ainsi, si on se place dans une approche spécifique du fonctionnement de la mémoire de travail, on peut penser que l'effet de la variation de la charge cognitive impliquée par la tâche secondaire devrait changer en fonction de l'encodage de prédilection réalisé et donc, de l'âge. Notamment, avec l'apparition d'un double encodage verbal-visuel à 6 ans, l'impact de la charge de la tâche secondaire devrait moins impacter les performances de rappel puisque le traitement puiserait dans le pool de ressources des informations visuospatiales, alors que le stockage engagerait des ressources du domaine verbal. Or, l'interaction entre la condition expérimentale de rappel et l'âge n'atteignait pas la significativité. Finalement, nos résultats vont bien dans le sens du partage d'un pool commun de ressources dans cette tâche comme défendu dans les modèles généraux.

D'autre part, les performances de rappel augmentaient avec l'âge. Ainsi, le nombre

de traces pouvant être activées à un moment t , soit en entrant à nouveau dans le focus attentionnel (Cowan, 1999), soit en ayant un niveau d'activation suffisant pour être récupérées (Barrouillet et al. 2004) augmente progressivement avec l'âge. Ceci revient à dire que la quantité d'attention disponible pour activer les traces mémorielles dans le système augmente avec l'âge. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, les traces mémorielles ne restaient pas actives plus longtemps chez les plus grands, augmentant ainsi leurs performances de rappel, puisque la vitesse de déclin temporel de l'information était similaire au travers de l'âge. De plus, l'augmentation de cette quantité d'attention disponible n'est pas en lien avec une quelconque mise en œuvre de stratégie entre 2 et 6 ans puisque le maintien est passif dans cette tranche d'âge. Ces résultats sur l'augmentation de la quantité de ressources attentionnelles disponibles sont en adéquation avec les conclusions des études comportementales (Bjorklund & Harnishfeger, 1990) ou basées sur la neuroimagerie (Posner, 2004) qui montrent une augmentation du contrôle de l'attention avec l'âge, notamment entre 3 et 5 ans. Toutefois, cette amélioration du contrôle attentionnel n'a pas été suffisante pour permettre au sujet de mettre en œuvre d'une stratégie de maintien, même dans la condition de délai vide, ou pour permettre la bascule entre maintien et traitement puisque les performances ont diminué linéairement au cours du temps.

Plus tôt dans le développement, le contrôle attentionnel avait commencé à se mettre en place avec la maturation du premier système d'orientation de l'attention sur les stimuli de l'environnement (Posner & Fan, 2004 ; Rothbart & Posner, 2001), dans la première année de vie (Colombo, 2001). Puis, le système d'attention antérieure (Ruff & Rothbart, 1996), qui effectue le traitement en tenant compte les représentations antérieures et en gérant les interférences de l'environnement, se développe entre 2 et 6 ans (Harman & Fox, 1997 ; Rothbart & Posner, 2001). A 6 ans, le contrôle attentionnel n'est pas encore suffisant pour permettre la mise en œuvre d'une stratégie de maintien de l'information, comme nous l'avons constaté ici et conformément à Camos et Barrouillet (2011). Ensuite, à partir de 7 ans les enfants réussissent à mettre en œuvre des stratégies de maintien de l'information. Enfin, entre 8 ans et la fin de l'adolescence, les enfants parviennent même à profiter de plus en plus efficacement de brefs moments où leur attention n'est pas engagée sur le traitement en cours pour rafraîchir ou reconstruire leurs traces mémorielles et ce, durant l'épisode même

de traitement (Barrouillet et al., 2009, pour une étude chez les 8-14 ans).

Finalement, l'augmentation développementale de l'empan observée entre 2 et 6 ans serait liée directement à l'augmentation des ressources attentionnelles. L'amélioration du contrôle attentionnel émergeant durant cette période n'est toutefois pas suffisante pour amener l'enfant à utiliser spontanément une stratégie de maintien de l'information, ou bien à l'utiliser de manière efficiente. Quelles pourraient-être les conditions qui aideraient le jeune enfant à améliorer encore son contrôle attentionnel, et ce de manière suffisante pour mettre en œuvre une stratégie de maintien de l'information efficace ? Towse et Hitch (1995 ; Towse et al., 1998) défendent l'idée que l'attention se déplace en fonction de la structure même de la tâche d'empan. Ainsi, nous avons cherché à déterminer comment faire évoluer la tâche proposée pour aider le jeune sujet à maintenir en mémoire le but de la tâche, et dégager ainsi des ressources attentionnelles. Ces dernières pourraient peut-être alors lui permettre d'engager une stratégie de maintien de l'information efficace. Le point suivant traite donc de l'aide potentielle de la mise en œuvre motrice et de la présence d'un indice visuel, relié sémantiquement au but de la tâche, au maintien du but en mémoire chez le jeune enfant.

9.2. Aide au maintien du but de la tâche en mémoire chez le jeune enfant

Trois facteurs expliquant l'augmentation développementale des capacités mémorielles ont déjà été cités. Un autre facteur, peu exploré dans la recherche sur la mémoire de travail, pourrait pourtant avoir un impact prépondérant, notamment chez les jeunes enfants qui ont peu de ressources attentionnelles. Ainsi, le maintien du but en mémoire est un champ de recherche bien connu des études sur les fonctions exécutives, et notamment sur la flexibilité cognitive. Bon nombre d'auteurs argumentent d'ailleurs que les piètres performances des jeunes enfants à certaines tâches comme les tâches de Stroop ou les tâches du *Dimension Change Cart Sort* avancé (Zelazo, 1996) serait lié à un phénomène d'oubli ou de négligence du but de la tâche, i.e. le *goal neglect* (Duncan et al., 1996 ; Duncan, 1995). Les jeunes enfants connaissent la réponse mais ne réalisent pourtant pas

correctement la tâche, peut-être parce que cela leur demande un effort de contrôle attentionnel qu'ils ne sont pas capables de mettre en œuvre tout en effectuant la tâche. La capacité de maintien du but de la tâche en mémoire est donc un facteur déterminant dans les performances des jeunes enfants (Chevalier & Blaye, 2009; Marcovitch et al., 2007; Marcovitch, et al., 2010; Towse, et al., 2007).

Or, pour effectuer une tâche comme celle que nous avons proposée, il faut, durant le temps de rétention, se représenter le but de l'activité puis le maintenir en mémoire dans le module de but, tel que décrit par Anderson (2004), tout au long de la tâche. En effet, c'est la poursuite du but qui va guider les actions à mener pour reconstituer la série de fruits. Le contrôle de la pensée et du comportement étant fortement lié au contexte (Braver et al., 2001 ; Towse & Hitch, 1995 ; Towse et al., 1998), notre hypothèse est qu'il est possible d'aider le jeune enfant à maintenir le but de l'activité en mémoire par les caractéristiques intrinsèques de la tâche. Cela pourrait peut-être l'amener d'ailleurs à mettre en œuvre une stratégie de maintien pour améliorer ses performances de rappel au cours du temps. L'introduction d'une activité naturelle de marche jusqu'à l'étal de la marchande nous a permis de tester l'impact d'une tâche secondaire motrice sur les performances de rappel au cours du temps. Puis, l'introduction de la vision d'un indice relié au but même de la tâche, dans une situation là aussi naturelle, i.e. voir ou ne pas voir l'étal durant la marche, nous a permis de tester l'impact d'un indice visuel sur les performances de rappel des jeunes enfants.

9.2.1. Impact de l'introduction d'une tâche secondaire motrice

Comme expliqué au cœur de la partie théorique, la motricité peut avantageusement influencer la cognition en soutenant notamment les activités cognitives (Cook & Goldin-Meadow, 2006). Ainsi, une activité secondaire motrice comme la marche d'intensité modérée, peut aider les enfants et les adultes à améliorer leur temps de réaction dans des tâches de détection visuelle (Deakin et al., 1998) et même leurs performances mémorielles (Schaefer et al., 2010). En fait, les résultats de notre thèse montrent que l'influence bénéfique de la mise en œuvre motrice dépend de la durée de rétention de l'information, en tous les cas chez les 4-6 ans. En effet, aucune étude préalable n'avait testé l'effet d'une

activité motrice sur les performances mémorielles des enfants de cette tranche d'âge, ni n'avait croisé l'introduction de ce facteur avec la variation du délai de rétention.

Ainsi, quand le délai de rétention était très court, environ deux secondes, alors les performances de rappel augmentaient par rapport à un rappel immédiat et ce, dans les trois groupes d'âges concernés et avec une intensité similaire au travers de l'âge (expérience 6). Ce résultat pourrait trouver deux explications. La première est que la mise en œuvre motrice a permis d'augmenter le niveau d'éveil du sujet (Adam et al., 1997 ; Humphreys & Revelle, 1984), c'est-à-dire les ressources attentionnelles disponibles. Le nombre d'items pouvant être activés en mémoire augmenteraient en conséquence et, de fait, les performances de rappel. L'autre hypothèse est que la mise en œuvre motrice a permis au jeune enfant de maintenir plus aisément le but de la tâche en mémoire et donc de dégager des ressources attentionnelles. Ainsi l'enfant orienterait plus efficacement l'attention sur les items à maintenir, voire les rafraîchiraient attentionnellement. Ces deux explications peuvent d'ailleurs se conjuguer, le dégagement de ressources attentionnelles par l'activité physique pouvant être mis au service du maintien du but.

Ces deux explications concordent également avec le fait que les performances de rappel intervenant après un délai d'environ 3.5 à 5 secondes, délai durant lequel la marche a été mise en œuvre, sont supérieures à un rappel différé vide (expérience 6 et 1), voire équivalentes à un rappel immédiat (expérience 6 pour un délai de 3.5 secondes). Ainsi, pour un délai de 3.5 à 5 secondes, la mise en œuvre d'une activité motrice a permis de contrecarrer l'oubli dû au temps, i.e. le déclin temporel des traces mémorielles. D'autre part, les performances de rappel étaient dégradées par l'augmentation de la charge cognitive de la tâche secondaire motrice (expériences 1 et 5). En effet, les performances de rappel dans ces conditions, i.e. marcher en passant sur les plots ou en contournant un plot, étaient inférieures à un rappel différé vide. Ainsi, quand la charge cognitive de la tâche secondaire motrice augmente, la programmation motrice exige davantage de ressources attentionnelles lesquelles ne peuvent plus être mises en œuvre sur le maintien des items. De plus, la marche étant encore coûteuse chez ces jeunes enfants (Cherng, Liang, Hwang & Chen, 2007; Cherng, Liang, Chen & Chen, 2009; Whittall, 1991), leur attention pouvait être davantage dirigée vers leurs pieds ou vers l'obstacle à contourner durant la réalisation de cette tâche motrice plus

élaborée. Cette orientation de l'attention a pu, bien entendu, détourner le jeune enfant du maintien même du but de la tâche. Les performances diminuent en conséquence.

Enfin, quand le délai durant lequel la marche est mise en œuvre est plus long, i.e. 6 secondes, alors les sujets ne réussissent plus à contrecarrer le déclin temporel des traces mémorielles. Les performances de rappel deviennent alors inférieures à un rappel immédiat (Expérience 6). Ainsi, si un rafraîchissement des traces mémorielles avait pu être mis en œuvre quand le délai de rétention était plus court, soit par augmentation des ressources attentionnelles soit par un maintien facilité du but en mémoire soit par une addition des deux facteurs, alors celui-ci ne réussit pas à contrecarrer l'oubli dû au temps sur un délai aussi long.

Ainsi, l'introduction d'une tâche secondaire motrice intégrée dans la situation de jeu du paradigme, i.e. marcher jusqu'à l'étal de la marchande, a eu un impact positif sur les performances de rappel des enfants entre 4 et 6 ans. Des résultats positifs de la marche sur les performances dans des tâches mémorielles ou des tâches de détection visuelle sont d'ailleurs rapportés dans la littérature. Elles concernaient des adultes (Adam et al., 1997 ; Collardeau et al., 2001) ou des enfants à partir de 8 ans (Deakin et al., 1988 ; Schaefer et al., 2010). C'est la première fois que l'impact de la mise en œuvre motrice, ici la marche, est mis en évidence chez des enfants aussi jeunes que 4 ans. Ceux-ci ont ainsi pu améliorer leurs performances de rappel par rapport à un rappel immédiat après 2 secondes de rétention. Ils ont également pu maintenir leurs performances de rappel par rapport à un rappel immédiat après un délai de rétention de 4 secondes environ. Au-delà, les performances diminuaient au cours du temps. Finalement, ces résultats amènent à penser que si les enfants de 7 ans utilisent un mécanisme de maintien, il serait plutôt attentionnel. En effet, l'information étant préférentiellement codée sous forme visuelle à cet âge, la réactivation de l'information se ferait sous la forme d'un rafraîchissement attentionnel. Cette stratégie pourrait émerger grâce aux caractéristiques intrinsèques de la tâche qui permettraient d'aider au maintien du but en mémoire, ici la mise en œuvre motrice. Examinons dès à présent l'impact d'un indice visuel relié au but de la tâche sur le maintien du but en mémoire.

9.3. Impact de la vision d'un indice lié sémantiquement au but de la tâche

Suite à l'expérience 1, nous avons émis l'hypothèse que le maintien du but en mémoire dans le module de but, avait pu être facilité par la vision de l'étal de la marchande durant la marche. En effet, il a été mis en évidence que les jeunes enfants ont des difficultés à se représenter le but à atteindre (Chevalier & Blaye, 2009). Or, mieux les sujets se représentent le but de l'activité et plus le contrôle attentionnel est efficace dans des tâches de flexibilité cognitive (Blaye et al., 2007; Maintenant & Blaye, 2008). Ainsi, voir un indice directement relié au but de la tâche à accomplir soutiendrait l'activité de maintien du but en mémoire du jeune enfant. Ceci a été mis en évidence dans des expériences sur la flexibilité cognitive menée auprès d'enfants d'âge scolaire et préscolaire : l'aide au maintien du but en mémoire permettrait d'augmenter le contrôle cognitif et donc les performances de rappel dans des tâches de flexibilité cognitive (Chevalier & Blaye, 2009 ; Blaye & Chevalier 2011). Pourtant, dans l'expérience menée spécifiquement sur ce thème, i.e. l'expérience 6, la vision du but n'a pas eu l'effet escompté. En effet, dans la condition de rappel après délai long, les conditions en délai court n'étant pas équivalentes au niveau du délai de rétention et n'étant donc pas comparables, les performances de rappel ne différaient pas, que l'étal de la marchande soit ou non visible durant la marche. De plus, lorsque les performances étaient analysées par rapport au délai de rétention effectif, les performances de rappel se répartissaient autour de droites de régression avec des coefficients de détermination très forts, (i.e. R^2 de .85 à .97), sans distinction entre les conditions indicées et les non-indicées. Ainsi, la vision d'un indice n'a pas eu d'effet positif sur les performances de rappel.

En fait, les différentes études menées sur l'impact des indices visuels et de leurs caractéristiques sur le contrôle cognitif chez le jeune enfant, tendent finalement à mettre en évidence que c'est la réactivation du but en lui-même, durant la tâche, qui est importante. Ainsi, Marcovitch et al. (2007, 2010) ont montré que les caractéristiques intrinsèques de la tâche, comme le fait d'être confronté à des stimuli souvent conflictuels, i.e. qui nécessitent de réactiver fréquemment le but de la tâche pour être correctement classés, amenaient les enfants à améliorer leurs performances. Les auteurs concluaient que c'était dû au fait que les sujets réactivaient eux-mêmes le but en mémoire, et ce avant la réalisation du tri de

cette carte. De la même façon, Lucenet, Blaye, Kray, et Chevalier (2011) ont mis en évidence que la verbalisation du but de la tâche par l'enfant lui-même, et ce juste avant son exécution, permettait d'améliorer les performances dans une tâche de tri de cartes, à 5 et 6 ans. On pourrait dire que ce qui compte finalement est que le jeune enfant soit cognitivement actif par rapport au maintien du but. Ainsi, que ce soit la consigne de la tâche qui le place dans cette activité (e.g. verbaliser) ou que soient les caractéristiques de la tâche elle-même qui le conduisent à l'être (e.g. cartes conflictuelles ; marche en direction de l'endroit où la tâche va être réalisée), l'important est qu'il réactive lui-même ce but. Cette caractéristique est d'ailleurs certainement d'autant plus importante que, dans les tâches utilisées classiquement dans l'étude de la flexibilité cognitive, i.e. DCCS, le but de la tâche varie au cours des essais. Ainsi, en fonction des essais, les sujets devaient effectuer un tri selon un but précis (e.g. la forme) ou selon un autre but (e.g. la couleur). Ainsi, en fonction de l'indice fourni et surtout de ses caractéristiques (e.g. sa transparence, Chevalier & Blaye, 2011), l'impact sur la facilité à se représenter et à maintenir le but en mémoire change. A l'opposé, dans notre tâche, le but était le même tout au long de l'activité. Il est possible que la tâche secondaire motrice, en dirigeant activant l'enfant vers l'objectif à atteindre pour réaliser la tâche, i.e. l'étal de la marchande, ait suffi à placer le sujet dans une posture cognitivement active qui l'a aidé à maintenir le but en mémoire. D'autre part, la matérialisation de l'emplacement de l'étal de la marchande par le drap blanc positionné devant, associé à la marche pour s'y rendre, pouvait tout à fait suffire dans notre expérience à aider l'enfant à se représenter le but de la tâche (e.g. je dois aller là pour prendre les fruits et les mettre dans le sac). Ceci était d'autant plus plausible que le but de la tâche ne changeait pas d'un essai sur l'autre. Ainsi, l'enfant ayant vu la marchande derrière le drap blanc au premier essai, la représentation du but et son maintien pour les essais suivants était facilitée pour les essais suivants et ce, même si le drap blanc occultait l'étal en lui-même.

Ainsi, l'impact de la vision du but n'a pu être mis spécifiquement en évidence au sein de notre étude. Toutefois, cela pouvait être dû à la manière dont nous avons conçu notre tâche. Tout d'abord, le drap blanc matérialisait malgré lui l'emplacement de l'étal de la marchande dans l'environnement, et pouvait ainsi suffire à aider l'enfant à se représenter le but à atteindre. Ceci était d'autant plus facile pour l'enfant qu'une fois qu'il avait découvert l'étal de la marchande après le premier essai, il pouvait se le représenter plus aisément les

essais suivants. Ensuite, le fait de marcher conjointement au fait de regarder l'étal ou le drap pouvait masquer l'éventuel bénéfice qu'aurait eu un indice visuel seul, du fait de l'impact bénéfique de l'activité motrice mis en évidence par ailleurs.

Finalement, le résultat important de cette étude est qu'il est possible d'aider le jeune enfant à maintenir le but de la tâche en mémoire en manipulant les caractéristiques intrinsèques de la tâche. Cette aide au maintien permet de dégager des ressources attentionnelles et/ou d'améliorer le contrôle attentionnel exercé sur la tâche. L'enfant a alors pu mettre en œuvre une stratégie de maintien, même si celle-ci ne s'est pas révélée suffisamment efficace pour empêcher le déclin des traces dans les délais longs.

10. Conclusions et perspectives.

Ce travail de thèse sur le maintien à court terme de l'information chez le jeune enfant permet de mettre en évidence trois résultats fondamentaux. Premièrement, les performances de rappel déclinent linéairement au cours du temps et ce, en l'absence de tâche secondaire, i.e. concurrente au maintien. Entre 2 et 6 ans, les sujets opèrent un maintien passif de l'information et ce, même quand leur attention n'est pas occupée à la réalisation d'une tâche secondaire. Ainsi, ils ne mettent pas en œuvre spontanément de stratégie de maintien de l'information. Deuxièmement, il a été montré pour la première fois que la vitesse d'oubli de l'information au cours du temps est similaire au travers de l'âge, en tous les cas entre 2 et 6 ans. Comme la vitesse de déclin temporel des traces mémorielles décline de manière similaire entre 2 et 6 ans, alors ce facteur ne peut être évoqué comme expliquant l'augmentation développementale de l'empan observée par ailleurs. En outre, l'absence de modification des pentes de déclin signe l'absence de stratégie de maintien de l'information, même parmi les sujets les plus âgés de l'étude. Ainsi, c'est bien l'augmentation des ressources attentionnelles ou du contrôle attentionnel qui est à l'origine de l'augmentation développementale des capacités mémorielles observées. Troisièmement, ce travail a montré qu'il est possible d'augmenter le contrôle attentionnel des jeunes enfants. Par l'introduction d'une tâche secondaire motrice faisant partie du jeu lui-même, le maintien du but de la tâche en mémoire a pu être facilité, ce qui était mis en évidence pour la première fois dans cette tranche d'âge. La mise en œuvre d'une stratégie de maintien a alors pu s'opérer, même si celle-ci n'a pas été suffisamment efficace pour contrecarrer l'oubli dû au temps sur des délais longs. Ce dernier résultat tend à confirmer l'idée que les jeunes enfants auraient à leur disposition des stratégies de maintien de l'information mais qu'ils ne réussiraient pas à les mettre en œuvre spontanément et qu'une aide au maintien du but de l'activité est nécessaire à leur mise en œuvre.

En prolongement de ce travail de thèse, de prochaines études devraient s'atteler à se faire rejoindre les deux courants de recherche, i.e. celui sur l'étude du fonctionnement de la mémoire de travail chez le jeune enfant et celui sur l'étude des fonctions exécutives et notamment l'aide au maintien du but en mémoire. Ainsi, il serait nécessaire d'explorer comment l'aide au maintien du but en mémoire peut impacter les performances de rappel

en mémoire de travail, chez le jeune enfant. Le degré de transparence des indices et leur occurrence pourraient ainsi être manipulés et les performances de rappel pourraient être observées au travers du temps, c'est-à-dire en faisant varier le délai de rétention de l'information. Ensuite, il serait primordial d'étendre les investigations sur l'impact de la mise en œuvre motrice sur l'aide au maintien du but. Ainsi, la manipulation du délai de rétention et le croisement avec des indices visuels plus ou moins transparents devraient être comparés à des performances en différé vide, i.e. sans tâche interférente, sur les mêmes délais de rétention. Ceci permettrait ainsi d'observer comment les performances évoluent au travers du temps et d'évaluer parallèlement l'efficacité de la stratégie de maintien mise en œuvre grâce à l'aide au maintien du but. On voit bien l'impact que des résultats dans ce domaine pourraient avoir sur les pratiques pédagogiques, notamment au cours préparatoire où l'apprentissage se fait bien souvent en position statique, et où la passation des consignes et la mise en œuvre des activités se font souvent à l'oral, sans un quelconque soutien au maintien du but en mémoire.

BIBLIOGRAPHIE

- Adam, J. J., Teeken, J. C., Ypelaar, P. J. C., Verstappen, F. T. J., & Paas, F. G. W. (1997). Exercise-induced arousal and information processing. *International Journal of Sport Psychology*, 28(3), 217–226.
- Adams, A.-M. & Gathercole, S. E. (1995). Phonological working memory and speech production in young children. *Journal of Speech and Hearing Research*, 38, 493-414
- Akshoomoff, N. A. (2002). Selective attention and active engagement in young children. *Developmental Neuropsychology*, 22, 625-642.
- Alibali, M.W. (2005). Gesture in spatial cognition: Expressing, communicating, and thinking about spatial information. *Spatial Cognition and Computation* 5 (4), 307-331.
- Alibali, M.W., DiRusso, A.A. (1999) The function of gesture in learning to count: More than keeping track. *Cognitive development* 14 (1), 37-56.
- Alloway, T. P., Gathercole, S. E., Adams, A.-M., Willis, C. S. (2005). Working memory abilities in children with special educational needs. *Educational and Child Psychology*, 22, 56-67
- Alloway, T. P., Gathercole, S. E., Willis, C. S., & Adams, A.-M. (2004). A structural analysis of working memory and related cognitive skills in young children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87, 85-170
- Alloway, T.P. & Alloway, R. G. (2010). Investigating the predictive roles of working memory and IQ in academic attainment. *Journal of Experimental Child Psychology*, 106, 20-29
- Alloway, T.P. & Alloway, R. G. (2010). Investigating the predictive roles of working memory and IQ in academic attainment. *Journal of Experimental Child Psychology*, 106, 20-29.
- Alloway, T.P., Gathercole, S.E., & Pickering, S.J. (2006). Verbal and visuo-spatial short-term and working memory in children: Are they separable? *Child Development*, 77, 1698-1716
- Alp, E. (1994). Measuring the size of working memory in very young children: The imitation sorting task. *International Journal of Behavioral Development*, 17, 125-141.
- Anderson, J. R. & Lebiere, C. (1998). *The Atomic Components of Thought*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Anderson, J. R. (1983). *The Architecture of Cognition*. Cambridge, MA: Harvard University Press
- Anderson, J. R. (1993). *Rules of the Mind*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Anderson, J. R. (1996). ACT: A simple theory of complex cognition. *American Psychologist*, 51, 355-365.
- Anderson, J. R., Bothell, D., Byrne, M. D., Douglass, S., Lebiere, C., & Qin, Y. (2004). An integrated theory of the mind. *Psychological Review* 111, (4). 1036-1060
- Anderson, J. R., Matessa, M., & Lebiere, C. (1997). ACT-R: A theory of higher level cognition and its relation to visual attention. *Human Computer Interaction*, 12(4), 439-462.
- Atkinson, R.C., & Shiffrin, R.M., (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In K.W. Spence & J.T. Spence (Eds), *The psychology of learning and motivation : Advances in research and theory* (Vol. 2, pp. 89-195). New York : Academic Press.
- Baddeley, A.D. (1986). *Working Memory*. Oxford: Clarendon Press.

- Baddeley, A.D. (1993) *Your Memory: A User's Guide (2nd edition)*. London: Lifecycle Publications
- Baddeley, A.D. (1996). Exploring the central executive. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 49 A, 5-28.
- Baddeley, A.D. (2000) The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*. 4, 11, 417-423.
- Baddeley, A.D. (2003) Working Memory: Looking back and looking forward. *Nature Reviews Neuroscience*, 4 (10): 829-839.
- Baddeley, A.D. (2012) Working Memory: Theories, Models, and Controversies. *Annual Review of Psychology*, 63, 1-29.
- Baddeley, A.D., & Hitch, G., (1974). Working memory. In G. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation*, 8 (pp. 47-90). New York : Academic Press.
- Baddeley, A.D., & Logie, R.H. (1999). Working Memory: The multiple-component model. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp.28-61). Cambridge: Cambridge University Press.
- Baddeley, A.D., Chincotta, D.M. & Adlam, A. (2001) Working memory and the control of action: Evidence from task switching. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130, 641-657.
- Baddeley, A.D., Emslie, H., Kolodny, J. & Duncan, J. (1998) Random generation and the executive control of working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 51A, (4): 819-852.
- 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: 575–589
- Baddeley, A.D., Gathercole, S.E. & Papagno, C., (1998) The phonological loop as a language learning device, *Psychological Review*, 105, (1): 158-173.
- Baird A.A., Kagan J., Gaudette T., Walz K., Hershlag N., Boas D. (2002). Frontal lobe activation during object permanence: Data from near infrared spectroscopy. *Neuroimage*, 16(4), 1120-1126.
- Bakeman, L.B., & Adamson, L.B. (1984). Coordinating attention to people and objects in mother-infant and peer-infant interaction. *Child Development*, 55, 1278-1289.
- Baldwin, J. M. (1895b). *Mental Development in the Child and the Race: Methods and Processes*. New York: Macmillan & Co.
- Balota, D.A., & Chumbley, J.I. (1984). Are lexical decisions a good measure of lexical access? The role of the neglected decision stage. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 3, 340-357
- Banta Lavenex P., Amaral D.G., Lavenex P., Hippocampal lesion prevents spatial relational learning in adult macaque monkeys. *Journal of Neuroscience: the Official Journal of the Society For Neuroscience* 26(17), pp. 4546-4558, 2006
- Banta Lavenex P., Lavenex P., Spatial memory and the monkey hippocampus: not all space is created equal. *Hippocampus* 19(1), pp. 8-19, 2009.

- Barker-Ward, L., Ornstein, P. A., & Holden, D. J. (1984). The expression of memorization in early childhood. *Journal of Experimental Child Psychology*, 31, 555-575.
- Barrouillet, P., & Gaillard, V. (2011). *Cognitive Development and Working Memory: A Dialogue between NeoPiagetian Theories and Cognitive Approaches*. New York, New York, USA: Psychology Press.
- Barrouillet P., Camos V., Morlaix S., Suchaut B. (2008). Compétences scolaires, capacités cognitives et origine sociale : quels liens à l'école élémentaire ? *Revue Française de Pédagogie*. N° 162, pp. 5-14
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2001). Developmental Increase in Working Memory Span: Resource Sharing or Temporal Decay? *Journal of Memory and Language*, 45(1), 1-20.
- Barrouillet, P., & Lecas, J.F. (1999). Mental models in conditional reasoning and working memory. *Thinking & Reasoning*, 5(4), 289-302.
- Barrouillet, P., & Lépine, R. (2005). Working memory and children's use of retrieval to solve addition problems. *Journal of Experimental Child Psychology*, 91, 183-204.
- Barrouillet, P., Bernardin, S., & Camos, V. (2004). Time constraints and resource sharing in adults' working memory spans. *Journal of Experimental Psychology : General*, 133, 83-100.
- Barrouillet, P., Bernardin, S., Portrat, S., Vergauwe, E., & Camos, V. (2007). Time and Cognitive Load in Working Memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 33(3), 570-585.
- Barrouillet, P., Gavens, N., Vergauwe, E., Gaillard, V., & Camos, V. (2009). Working memory span development: a time-based resource-sharing model account. *Developmental Psychology*, 45(2), 477-490.
- Barrouillet, P., Portrat, S., Vergauwe, E., Diependaele, K., & Camos, V. (2011). Further evidence for temporal decay in working memory. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 37, 1302-1317.
- Bates, E. (1976). *Language and context: The acquisition of pragmatics*. New York: Academic Press.
- Bates, E., Benigni, L., Bretherton, I. Camaioni, L. & Volterra, V. (1979). *The emergence of symbols: Cognition and communication in infancy*. New York: Academic Press.
- Bauer, P. J. (2002). Long-term recall memory: Behavioral and neuro-developmental changes in the first 2 years of life. *Current Directions in Psychological Science*, 11, 137-141.
- Bauer, P. J. (2009). The cognitive neuroscience of the development of memory. In M. L. Courage & N. Cowan (Eds.), *The Development of Memory in Infancy and Childhood, Second Edition* (pp. 115-144). New York, NY: Psychology Press.
- Bayliss, D. M., Jarrold, C., Baddeley, A. D., Gunn, D. M., & Leigh, E. (2005). Mapping the developmental constraints on working memory span performance. *Developmental psychology*, 41(4), 579-597.

- Bayliss, D.M., Jarrold, C.J., Baddeley, A.D., & Gun, D.M. (2003). *The relationships between short term memory and working memory: Complex span made simple?* In short term/working memory: The second Quebec conference on short term/ working memory (2005). Psychology Press. Vol 13(3/4), 414-421.
- Beilock, S.L., Carr, T.H., MacMahon, C. and Starkes, J.L. (2002). When paying attention becomes counterproductive: impact of divided versus skill-focused attention on novice and experienced performance of sensorimotor skills. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 8, 6–16.
- Bell, M. A., & Cuevas, K. (2012). The use of EEG to study cognitive development: Issues and practices. Invited as a feature for “Tools of the Trade” series, *Journal of Cognition and Development*, 13, 281-294
- Bell, M.A., & Fox, N.A. (1994). Brain development over the first year of life: Relations between EEG frequency and coherence and cognitive and affective behaviors. In G. Dawson & K. Fischer (Eds.), *Human behavior and the developing brain* (pp. 314-345). New York: Guilford.
- Bell, M.A., & Wolfe, C.D. (2007). Changes in brain functioning from infancy to early childhood: Evidence from EEG power and coherence during working memory tasks. *Developmental Neuropsychology*, 31, 21-38
- Bell, M.A., and Fox, N. A. (1992). The relations between frontal brain electrical activity and cognitive development during infancy. *Child Development*, 63, 1142–1163.
- Bell, S.M. (1970). The development of the concept of object as related to infant-mother attachment. *Child Development*, 41, 291-311
- Benes, F. M. (2001). The development of prefrontal cortex: The maturation of neurotransmitter systems and their interaction. In C.A. Nelson & M. Luciana (Eds). *Handbook of developmental cognitive neuroscience* (pp79-92). Cambridge, MA: MIT press.
- Berman, M., Jonides, J., Lewis, R.L. (2009). In search of decay in verbal short-term memory. *Journal of Experiment Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35(2), 317-333.
- Best, J. R., Miller, P. H., & Jones, L. L. (2009). Executive functions after age 5: Changes and correlates. *Developmental Review*, 29, 180–200.
- Bigelow, A., MacDonald, D., & MacDonald, L. (1995). The development of infants' search for their mothers, unfamiliar people, and objects. *Merrill-Palmer Quarterly*, 41(2), 191-208.
- Bjorklund, D. F., & Harnishfeger, K. K. (1990). The resources construct in cognitive development: Diverse sources of evidence and a model of inefficient inhibition. *Developmental Review*, 10, 48-71.
- Bjorklund, D. F., Dukes, C., & Brown, R. D. (2009). The development of memory strategies. In M. Courage & N. Cowan (Eds.), *The development of memory in infancy and childhood* (pp. 145-175).
- Blair, I.V. (2002). The malleability of automatic stereotypes and prejudice. *Personality and Social Psychology Review*, 6, 242-261.

- Blaye, A., & Chevalier, N. (2011). The role of goal representation in preschoolers' flexibility and inhibition. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108, 469-483.
- Blaye, A., & Jacques, S. (2009). Categorical Flexibility in Preschoolers: Contributions of Conceptual Knowledge and Executive Control. *Developmental Science*, 12, 6, 863-873.
- Blaye, A., Chevalier, N., & Paour, J.-L. (2007). The development of intentional control of categorization behaviour: A study of children's relational flexibility. *Cognition, Brain, Behavior*, 11(4), 791-808.
- Blumberg, F. C., Torenberg, M., Randall, J. D. (2005). The relationship between preschoolers' selective attention and memory for location strategies. *Cognitive Development* vol. 20 issue 2, p. 242-255
- Blumberg, F. C.; Torenberg, M. (2005). The effects of spatial configuration on preschoolers' attention strategies, selective attention, and incidental learning. *Infant and Child Development* vol. 14 issue 3, p. 243 – 258
- Braver, T. S., Barch, D. M., Gray, J. R., Molfese, D. L., & Snyder, A. (2001). Anterior cingulate cortex and response conflict: Effects of frequency, inhibition and errors. *Cerebral Cortex*, 11, 825-836.
- Braver, T. S., Cohen, J. D., Nystrom, L. E., Jonides, J., Smith, E. E., & Noll, D. C. (1997). A parametric study of prefrontal cortex involvement in human working memory. *NeuroImage*, 5, 49-62.
- Broadbent, D. E. (1975), Cognitive psychology and education. *British Journal of Educational Psychology*, 45: 162–176
- Broaders, S., Cook, S. W., Mitchell, Z., & Goldin-Meadow, S. (2007) Making children gesture reveals implicit knowledge and leads to learning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 2007, 136(4), 539-550.
- Brown, J. (1958). Some tests of the decay theory of immediate memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 10(1), 12 - 21.
- Bruner, J. S. (1975). The ontogenesis of speech acts. *Journal of Child Language*, 2, 1-19.
- Bub, D. N., Masson, M. E. J., & Lalonde, C. E. (2006). Cognitive control in children: Stroop interference and suppression of word reading. *Psychological Science*, 17, 351-357.
- Buchman A.S., Boyle P.A., Yu L., Shah R.C., Wilson R.S., Bennett D.A. Total daily physical activity and the risk of AD and cognitive decline in older adults. *Neurology* 2012; 78(17):1323-1329.
- Bull R., Johnston, R.S., Roy J.A. (1999). Exploring the role of the visual-spatial sketch pad and central executive in children's arithmetical skills: Views from cognition and developmental neuropsychology. *Developmental Neuropsychology*, 15 : 421-442
- Bull, R., Scerif, G. (2001). Executive functioning as a predictor of children's mathematics ability: Inhibition, switching, and working memory. *Developmental Neuropsychology*, 19: 273-293

- Bunge, S. A., Klingberg, T., Jacobsen, R. B., & Gabrieli, J. D. E. (2000). A resource model of the neural basis of executive working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 97*, 3573-3578.
- Burgess, P.W. & Simons, J.S. (2005). Theories of frontal lobe executive function: Clinical applications. In P.W. Halligan & D.T. Wade (Eds.) *Effectiveness of Rehabilitation for Cognitive Deficits* (pp. 211-231). Oxford University Press, Oxford.
- Burtis, P. J. (1982). Capacity increase and chunking in the development of short-term memory. *Journal of Experimental Child Psychology, 34*, 387-413.
- Cain, K., Oakhill, J., & Bryant, P. E. (2004). Children's reading comprehension ability: Concurrent prediction by working memory, verbal ability, and component skills. *Journal of Educational Psychology, 96*, 31-42.
- Camos, V., & Barrouillet, P. (2011). Developmental changes in working memory strategies: From task switching to time-based resource sharing. *Developmental Psychology, 47*, 898-904.
- Camos, V., Barrouillet, P., & Fayol, M. (2001). Does the coordination of verbal and motor information explain the development of counting in children? *Journal of Experimental Child Psychology, 78*, 240-262.
- Camos, V., Fayol, M., Barrouillet, P. (1999). L'activité de dénombrement chez l'enfant : double tâche ou procédure ? *Année Psychologique, 99*, 623-645.
- Carlson, S. M. (2005). Developmentally sensitive measures of executive function in preschool children. *Developmental Neuropsychology, 28*, 595-616.
- Case, R. (1978). Intellectual development from birth to adulthood: A neo-Piagetian approach. In R. S. Siegler (Ed.), *Children's thinking: What develops?* Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Case, R. (1985). *Intellectual development: Birth to adulthood*. San Diego: Academic Press.
- Case, R. (1991). *The mind's staircase*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Case, R. D., Kurland, D. M., & Goldberg, J. (1982). Operational efficiency and the growth of short-term memory span. *Journal of Experimental Child Psychology, 33*, 386-404.
- Casey, B.J., Tottenham, N., Liston, C., & Durston, S. (2005). Imaging the developing brain: what have learned about cognitive development? *TRENDS in Cognitive Science, 9*(3), 104-110.
- Chalard, M., Bonin, P., Méot, A., Boyer, B., & Fayol, M. (2003). Objective age-of-acquisition (AoA) norms for a set of 230 object names in French: Relationships with other variables used in psycholinguistic experiments, the English data from Morrison et al. (1997), and naming latencies. *European Journal of Cognitive Psychology, 15*, 209-245.
- Cherng R.J., Liang, L.Y., Chen, Y.J., Chen, J.Y. (2009). The effects of a motor and a cognitive concurrent task on walking in children with developmental coordination disorder. *Gait & Posture, 29*(2):204-207.
- Cherng R.J., Liang, L.Y., Hwang, I.S., Chen, J.Y. (2007). The effect of a concurrent task on the walking performance of preschool children. *Gait & Posture, 26*:231-237.

- Chevalier, N., & Blaye, A. (2006). False-Belief representation and attribution in preschoolers : Testing a graded-representation hypothesis. *Current Psychology Letters, Behaviour, Brain, & Cognition*, 18, 1.
- Chevalier, N., & Blaye, A. (2009). Setting goals to switch between tasks: Effect of cue transparency on children's cognitive flexibility. *Developmental Psychology*, 45(3), 782-797.
- Chu, M., & Kita, S. (2008). Spontaneous gestures during mental rotation tasks: Insights into the microdevelopment of the motor strategy. *Journal of Experimental Psychology: General*, 137(4), 706-723.
- Church, R. B., Ayman-Nolley, S., & Mahootian, S. (2004). The role of gesture in bilingual education: Does gesture enhance learning? *International Journal of Bilingual Education & Bilingualism*, 7(4), 303-320.
- Church, R.B., Ayman-Nolley, S., & Mahootian, S. (2004). The effects of gestural instruction on bilingual children. *International Journal of Bilingual Education and Bilingualism*, 7, 303–319.
- Cohen, J. D., Perlstein, W. M., Braver, T. S., Nystrom, L. E., Noll, D. C., Jonides, J., & Smith, E. E. (1997). Temporal dynamics of brain activation during a working memory task. *Nature*, 386, 604-608.
- Cohen, R. L. & G. Bean (1983). Memory in educable mentally retarded adults: Deficit in subject or experimenter? *Intelligence*, 7, 287–298.
- Collardeau, M., Brisswalter, J., & Audiffren, M. (2001). Effects of a prolonged run on simple reaction time of well-trained runners. *Perceptual and Motor Skills*, 93, 679–689.
- Colombo, J. (2001). The development of visual attention in infancy. *Annual Review of Psychology*, 52, 337-367.
- Conway, A. R. A., Cowan, N., & Bunting, M. F. (2001). The cocktail party phenomenon revisited: The importance of working memory capacity. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8, 331–335.
- Conway, A. R. A., Kane, M. J., Bunting, M. F., Hambrick, D. Z., Wilhelm, O., & Engle, R. W. (2005). Working memory span tasks: A methodological review and user's guide. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12, 769-786
- Cook, S. W., & Goldin-Meadow, S. (2006). The role of gesture in learning: Do children use their hands to change their minds? *Journal of Cognition and Development*, 7, 211–232.
- Cook, S. W., Yip, T., Goldin-Meadow, S. Gestures, but not meaningless movements, lighten working memory load when explaining math. *Language and Cognitive Processes*, 2012, 27, 594-610.
- Cooper, R., & Shallice, T. (2000). Contention scheduling and the control of routine activities. *Cognitive Neuropsychology*, 17, 297.
- Corkum, V., Byrne, J. M., & Ellsworth, C. (1995). Clinical assessment of sustained attention in preschoolers. *Child Neuropsychology*, 1, 3-18.

- Courage, M.L., & Cowan, N. (Eds.). (2009). *The development of memory in infancy and childhood*. Hove, U.K.: Psychology Press.
- Cowan, N., Wood, N.L., Wood, P.K., Keller, T.A., Nugent, L.D., & Keller, C.V. (1998) . Two separate verbal processing rates contributing to short-term memory span. *Journal of Experimental Psychology: General*, *127*, 141-160.
- Cowan, N., Nugent, L.D., Elliott, E.M., & Saults, J.S. (2000). Persistence of memory for ignored lists of digits: Areas of developmental constancy and change. *Journal of Experimental Child Psychology*, *76*, 151-172.
- Cowan, N. (1988). Evolving conceptions of memory storage, selective attention, and their mutual constraints within the human information processing system. *Psychological Bulletin*, *104*, 163-191.
- Cowan, N. (1995). *Attention and memory: An integrated framework*. Oxford Psychology Series, No. 26. New York: Oxford University Press.
- Cowan, N., Morey, C. C., AuBuchon, A. M., Zwilling, C. E., & Gilchrist, A. L. (2010). Seven-year-olds allocate attention like adults unless working memory is overloaded. *Developmental Science*, *13*, 120-133.
- Cowan, N. (1999). An embedded-processes model of working memory. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of Working Memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 62-101). Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*, 87-185.
- Cowan, N., & Alloway, T. (2009). Development of Working Memory In Childhood. In M.L. Courage & N. Cowan (Eds.), *The development of memory in infancy and childhood*. Hove, East Sussex, UK: Psychology Press, 303-342.
- Cowan, N., & AuBuchon, A.M. (2008). Short-term memory loss over time without retroactive stimulus interference. *Psychonomic Bulletin & Review*, *15*, 230-235.
- Cowan, N., Elliott, E.M., Saults, J.S., Morey, C.C., Mattox, S., Hismjatullina, A., & Conway, A.R.A. (2005). On the capacity of attention: Its estimation and its role in working memory and cognitive aptitudes. *Cognitive Psychology*, *51*, 42-100.
- Cowan, N., Wood, N. L., & Borne, D. N. (1994). Reconfirmation of the short-term storage concept. *Psychological Science*, *5*(2), 103-106.
- Cragg, L., & Chevalier, N. (2012). The processes underlying flexibility in childhood. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* *65*, 209-232.
- Craik, F. I. M., & Lockhart, R. S. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal behavior*, *11*, 671-684.
- Cuevas, K., & Bell, M. A. (2010). Developmental progression of looking and reaching performance of the A-not-B task. *Developmental Psychology*, *46*, 1363-1371.
- Cuevas, K., Bell, M. A., Marcovitch, S., & Calkins, S. D. (2012). EEG and heart rate measures of working memory at 5 and 10 months of age. *Developmental Psychology*, *48*, 907-917.

- D'Esposito, M., Detre, J. A., Alsop, D. C., Shin, R. K., Atlas, S., & Grossman, M. (1995). The neural basis of the central executive system of working memory. *Nature*, *378*, 279-281.
- D'Esposito, M., Postle, B. R., Ballard, D., & Lease, J. (1999). Maintenance versus manipulation of information held in working memory: An event-related fMRI study. *Brain & Cognition*, *41*, 66-86.
- Dagenbach, D., & Carr, T. H. (1994). *Inhibitory processes in attention, memory, and language*. San Diego, CA: Academic Press.
- Damasio H (1995) *Human brain anatomy in computerized images*. New York: Oxford University Press.
- Daneman, M., Carpenter, P.A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *19*, 450-466.
- Daneman, M., Green, I (1986). Individual differences in comprehending and producing words in context. *Journal of Memory and Language*. *25*, 1-18.
- Davidson, M. C., Amso, D., Cruess Anderson, L., & Diamond, A. (2006). Development of cognitive control and executive functions from 4 to 13 years: Evidence from manipulations of memory, inhibition, and task switching. *Neuropsychologia*, *44*, 2037-2078.
- Davranche, K., & Audiffren, M. (2004). Facilitating effects of exercise on information processing. *Journal of Sports Sciences*, *22*(5), 419-428.
- Davranche, K., & McMorris, T. (2009). Specific effects of acute moderate exercise on cognitive control. *Brain and Cognition*, *69*(3): 565-570
- Davranche, K., Burle, B., Audiffren, M., & Hasbroucq, T. (2005). Information processing during physical exercise: A chronometric and electromyographic study. *Experimental Brain Research*, *165*(4), 532-540.
- Davranche, K., Burle, B., Audiffren, M., & Hasbroucq, T. (2006). Physical exercise facilitates motor processes in simple reaction time performance. An electromyographic analysis. *Neuroscience Letters*, *396*(1), 54-56.
- De Jong, P.F. (1998). Working memory deficits of reading disabled children, *Journal of Experimental Child Psychology*, *70*, 75-96.
- de Ribaupierre, A., & Bailleux, C. (1994). Developmental change in a spatial task of attentional capacity: An essay toward an integration of two working memory models. *International Journal of Behavioral Development*, *17*(1), 5-35.
- de Ribaupierre, A., Neiryck, I., & Spira, A. (1989). Interactions between basic capacity and strategies in children's memory: Construction of a developmental paradigm. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, *9*(5), 471-504.
- Deakin, J. M., Starks, J. L., & Elliott, D. (1988). Feature integration of children during exercise. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, *10*, 248-261.
- DeLoache, J.S. & Brown, A.L. (1983). Very young children's memory for the location of objects in a large scale environment. *Child Development*, *54*, 888-897.

- DeLoache, J.S., Cassidy, D.J., & Brown, A.L. (1985). Precursors of mnemonic strategies in very young children. *Child Development, 56*, 125-137.
- DeMarie, D., & Ferron, J. (2003). Capacity, strategies, and metamemory: Tests of a three-factor model of memory development. *Journal of Experimental Child Psychology, 84*(3), 167-193.
- Dempster, F. N., & Brainerd, C. J. (1995). *Interference and inhibition in cognition*. San Diego, CA: Academic Press.
- Dempster, F. N., & Brainerds, C. J. (Eds.). (1995). *Interference and inhibition in cognition and behavior*. San Diego, CA: Academic Press.
- Dempster, F.N. (1981). Memory span: Sources of individual and developmental differences. *Psychological Bulletin, 89*, 63±100.
- Dempster, F.N. (1985). Proactive interference in sentence recall: Topic-similarity effects and individual differences. *Memory and Cognition, 13*, 81-89.
- Diamond, A. & Doar, B. (1989). The performance of human infants on a measure of frontal cortex function, the delayed response task. *Developmental Psychobiology, 22*, 271-294
- Diamond, A. (1985). The development of the ability to use recall to guide action, as indicated by infants' performance on A-not-B. *Child Development, 56*, 868-883
- Diamond, A. (2013). Executive Functions. *Annual Review of Psychology, 64*, 135-168.
- Diamond, A., Prevor, M., Callender, G., & Druin, D.P. (1997). Prefrontal cortex cognitive deficits in children treated early and continuously for PKU. *Monographs of the Society for Research in Child Development (Monograph #252), 62* (4), 1-207.
- Donchin, E., Ritter, W., & McCallum, C. (1978). Cognitive psychophysiology: The endogenous components of the ERP. In E. Callaway, P. Tueting, & S. Koslow (Eds.), *Brain event-related potentials in man* (pp. 349-441). New York: Academic Press
- Duncan, J. (1986). Disorganization of behaviour after frontal-lobe damage. *Cognitive Neuropsychology, 3*, 271—290.
- Duncan, J. D. (1995) *Attention, intelligence and the frontal lobes*. In M.S. Gazzaniga (Ed.), *The New Cognitive Neurosciences*. The MIT Press, 721-733
- Duncan, J., Emslie, H., Williams, P., Johnson, R., Freer, C. (1996). Intelligence and the frontal lobe: the organization of goal-directed behavior, *Cognitive Psychology, 30*(3):257-303.
- Eckenhoff, M., & Rakic, P. (1991). A quantitative analysis of synaptogenesis in the molecular layer of the dentate gyrus in the rhesus monkey. *Developmental Brain Research, 64*, 129–135.
- Emerson, M.J., & Miyake, A. (2003). The role of inner speech in task switching: A dual-task investigation. *Journal of Memory and Language, 48*, 148–168.
- Engelkamp, J. & H. Krumnacker (1980). Imaginale und motorische Prozesse beim Behalten verbalen Materials. *Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie, 511–533*.

- Engelkamp, J. & Zimmer, H. D. (1984). Motor program information as a separable memory unit. *Psychological Research*, 46, 283-299.
- Engle, R. W., & Kane, M. J. (2004). Executive attention, working memory capacity, and a two-factor theory of cognitive control. In Ross (Ed.). *The psychology of learning and motivation* 44, 145-199.
- Engle, R. W., Tuholski, S. W., Laughlin, J. E., & Conway, A. R. A. (1999). Working memory, short-term memory and general fluid intelligence: A latent-variable approach. *Journal of Experimental Psychology: General*, 128, 309-331.
- Engle, R.W. & Oransky, N. (1999). The evolution from short-term to working memory: Multi-store to dynamic models of temporary storage. In R. Sternberg (Ed.), *The nature of human cognition*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Engle, R.W., Carullo, J.J., Collins, K.W. (1991). Individual differences in working memory for comprehension and following directions. *Journal of Educational Research*, 84, 253–262
- Engle, R.W., Kane, M.J. & Tuholski, S.W. (1999). Individual differences in working memory capacity and what they tell us about controlled attention, general fluid intelligence and functions of the prefrontal cortex. In Miyake, A. & Shah, P. (Eds.) *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*. London: Cambridge Press.
- Engle, R.W., Tuholski, S.W., Laughlin, J.E., & Conway, A.R.A. (1999). Working Memory, short-term memory, and general fluid intelligence: A latent-variable approach. *Journal of Experimental Psychology : General*, 128, 309-331.
- Erickson, K. I., Voss, M. W., Prakash, R. S., Basak, C., Szabo, A., Chaddock, L., Kramer, A. F. (2011). Exercise training increases size of hippocampus and improves memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 108, 3017–3022.
- Ferguson, A.N., Bowey, J.A. & Tilley, A. (2002). The association between auditory memory span and speech rate in children from kindergarten to sixth grade. *Journal of Experimental Child Psychology*, 81, 141-156.
- Ferrell, J.E.J., Machleder, E.M. (1998) *The biochemical basis of an all-or-none cell fate switch in Xenopus oocytes*. *Science* 280:895–898.
- Fisk, J.E., & Sharp, C.A. (2004). Age-related impairment in executive functioning: updating, inhibition shifting, and access. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 26, 874–890
- Flavell, J. H., Beach, D. R. , & Chinsky, J. M. (1966) . Spontaneous verbal rehearsal in a memory task as a function of age. *Child Development*, 37, 283-299.
- Flavell, J. H. (1979). Metacognition and cognitive monitoring. *American Psychologist*, 34, 906–911.
- Flavell, J., Green, F., & Flavell, E. (1986). Development of knowledge about the appearance-reality distinction. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 51(1, Serial No. 212).
- Forster, K. I., & Chambers, S. (1973). Lexical access and naming time. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behaviour*, 12, 627-635.

- Friedman, N.P., Miyake, A., Corley, R.P., Young, S.E., DeFries, J.C., & Hewitt, J.K. (2006). Not all executive functions are related to intelligence. *Psychological Science, 17*, 172–179.
- Friedman, N.P., Miyake, A., Young, S.E., DeFries, J.C., Corley, R.P., & Hewitt, J.K. (2008). Individual differences in executive functions are almost entirely genetic in origin. *Journal of Experimental Psychology: General, 137*, 201–225.
- 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*, 469-479.
- Garavan, H. (1998). Serial attention within working memory. *Memory & Cognition, 26* (2), 263-276.
- Garcia-Garcia, M., Barcelo, F., Clemente, I.C., Escera, C. (2010) DAT1 crucial role on rapid detection of task-relevant sensory changes *Neuropsychologia 48(14)*, 4136-4141.
- Gathercole, S. E., Adams, A.-M. & Hitch. (1994). Do young children rehearse? An individual differences analysis. *Memory & Cognition, 22*, 201-207.
- Gathercole, S. E. & Adams, A.-M. (1993). Phonological working memory in very young children. *Developmental Psychology, 29*, 770-778.
- Gathercole, S. E. & Pickering, S. J. (2000a). Assessment of working memory in six- and seven-year old children. *Journal of Educational Psychology, 92*, 377-390
- Gathercole, S. E. (1999). Cognitive approaches to the development of short-term memory. *Trends in Cognitive Science, 3*, 410-418.
- Gathercole, S. E., & Alloway, T. P. (2004). Working memory and classroom learning. *Journal of the Professional for Teachers of Students with Specific Learning Difficulties, 2-12*.
- Gathercole, S. E., & Alloway, T. P. (2008). Working memory and classroom learning. In K. Thurman and K. Fiorello (Eds), *Cognitive Development in K-3 Classroom Learning: Research Applications*.
- Gathercole, S. E., & Pickering, S. J. (2000b). Working memory deficits in children with low achievements in the national curriculum at seven years of age. *British Journal of Educational Psychology, 70*, 177-194.
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Ambridge, B., & Wearing, H. (2004). The structure of working memory from 4 to 15 years of age. *Developmental Psychology, 40*, 177-190.
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Knight, C., & Stegmann, Z. (2004). Working memory skills and educational attainment: Evidence from National Curriculum assessments at 7 and 14 years of age. *Applied Cognitive Psychology, 40*, 1-16
- Gathercole, S. E., Service, E., Hitch, G. J., Adams, A.M., & Martin, A. J. (1999). Phonological short-term memory and vocabulary development: Further evidence on the nature of the relationship. *Applied Cognitive Psychology, 13*, 65-77.
- Gathercole, S.E., Durling, M., Evans, S., Jeffcock, E., & Stone, S., (2008) Working memory abilities and children's performance in laboratory analogues of classroom activities. *Applied Cognitive Psychology, 22*, 1019-1037

- Gathercole, S.E., Lamont, E., & Alloway, T.P. (2006). Working memory in the classroom. In S. Pickering (Ed.). *Working memory and education*, pp. 219-240. Elsevier Press.
- Gavens, N., & Barrouillet, P. (2004). Delays of retention, processing efficiency, and attentional resources in working memory span development. *Journal of Memory and Language*, *51*, 644-657.
- Geary, D. C., Hoard, M. K., & Byrd-Craven, J. (2004). Strategy choices in simple and complex addition: Contributions of working memory and counting knowledge for children with mathematical disability. *Journal of Experimental Child Psychology*, *88*, 121-151.
- Geary, D.C., Brown, S.C., & Samaranayake, V.A. (1991). Cognitive addition: A short longitudinal study of strategy choice and speed-of-processing differences in normal and mathematically disabled children. *Developmental Psychology*, *27*, 787-797.
- Geary, D.C., Hoard, M.K., & Hamson, C.O. (1999). Numerical and arithmetical cognition: Patterns of functions and deficits in children at risk for a mathematical disability. *Journal of Experimental Child Psychology*, *74*, 213-239.
- Gerstadt, C. L., Hong, Y. J., & Diamond, A. (1994). The relationship between cognition and action: Performance of children 3.5 to 7 years old on Stroop-like day-night test. *Cognition*, *53*, 129-153.
- Geurts, H., Corbett, B., & Solomon, M. (2009). The paradox of cognitive flexibility in autism spectrum disorders. *Trends in Cognitive Science*, *13*, 74-82. 16.
- 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*, 252-265.
- Glanzer M, Razel M. (1974). The size of the unit in short-term storage. *Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior*, *13*(1), 114-131.
- Gobet, F., Clarkson, G. (2004). Chunks in expert memory: Evidence for the magical number four...or is it two? *Memory* *12*, 732-747.
- Goldin-Meadow, S. (2011). *What modern-day gesture can tell us about language evolution*. In K. Gibson and M. Tallerman (eds.), *Oxford handbook of language evolution*, Oxford: Oxford University Press,
- Goldin-Meadow, S., Nusbaum, H., Kelly, S. D., & Wagner, S. (2001). Explaining math: Gesturing lightens the load. *Psychological Science*, *12*(6), 516-522.
- Graf, P., & Masson, M.E.J. (1993). *Implicit memory: new directions in cognition, development, and neuropsychology*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Gruber, O., & Goschke, T. (2004). Executive control emerging from dynamic interactions between brain systems mediating language, working memory and attentional processes. *Acta Psychologica*, *115*, 105-121.
- Guttentag, R. E. (1989) Age differences in dual-task performance: Procedures, assumptions, and results. *Developmental Review*, *9*, 146-170.

- Hagen, J. W. (1967). A developmental study of task-relevant and task-irrelevant information processing under distraction and non-distraction conditions. *Child Development, 38*, 685-694.
- Hale, S., Myerson, J., Rhee, S. H., Weiss, C. S., & Abrams, R. A. (1996). Selective interference with the maintenance of location information in working memory. *Neuropsychology, 10*, 228-240.
- Halford, G.S. (1993). *Children's Understanding: The Development of Mental Models*. Hillsdale, N.J.: Erlbaum.;
- Halford, G.S., Maybery M.T., O'Hare, A.W. & Grant, P. (1994) The Development of Memory and Processing Capacity. *Child Development, 65(5)*, 1338-1356
- Harding, C., & Golinkoff, R. (1979). The origins of intentional vocalizations in prelinguistic infants. *Child Development, 50*, 33-40
- Harman, C., & Fox, N. A. (1997). Frontal and attentional mechanisms regulating distress experience and expression during infancy. In N. A. Krasnegor, G. R. Lyon, & P. S. Goldman-Rakic (Eds.), *Development of the prefrontal cortex: Evolution, neurobiology, and behavior* (pp. 191-208). Baltimore: Paul H. Brookes.
- Harnishfeger, K. K., & Bjorklund, D. F. (1990). Children's strategies: A brief history. In D. F. Bjorklund (Ed.), *Children's strategies: Contemporary views of cognitive development* (pp. 1-22). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Hasher, L., & Zacks, R. T. (1988). Working memory, comprehension, and aging: A review and new view. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (Vol. 22, pp. 193-225). New York: Academic Press.
- Hayes, D. S., & Schulze, S. A. (1977). Visual encoding in preschoolers' serial retention. *Child Development, 48*, 1066-1070.
- Heisel, B. E., & Ritter, K. (1981). Young children's storage behavior in a memory-for-location task. *Journal of Experimental Child Psychology, 31*, 350-364.
- Henry, L.A. (1991). The development of auditory memory span: The role of rehearsal. *British Journal of Developmental Psychology, 9*, 493-511.
- Henry, L.A.; Messer, D., Luger-Klein, S., & Crane, L. (2012). Phonological, visual and semantic coding strategies and children's short-term picture memory span. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 65(10)*, 2033-2053.
- Hillman, C. H., Erickson K.i., & Kramer, A.F. (2008). Be smart, exercise your heart: exercise effects on brain and cognition. *Nature Reviews Neuroscience 9*, 58-65
- Hitch, G.J. & Halliday, M.S. (1983). Working memory in children. *Philosophical Transactions of the Royal Society London Series B, 302*, 325-340.
- Hitch, G.J. (2006). Working memory in children: A cognitive approach. In E. Bialystock & F.I.M. Craik & (Eds.), *Lifespan Cognition*, pp. 112-127. Oxford: Oxford University Press.
- Hitch, G.J., Halliday, M.S., Schaafstal, A. and Schraagen, J.M. (1988). Visual working memory in young children. *Memory and Cognition, 16*, 120-132.

- Hitch, G.J., Towse, J.N. & Hutton, U. (2001). What limits children's working memory span? Theoretical accounts and application to scholastic development. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130, 184-198.
- Hongwanishkul, D., Happaney, K. R., Lee, W. S. C., & Zelazo, P. D. (2005). Assessment of hot and cool executive function in young children: Age-related changes and individual differences. *Developmental Neuropsychology*, 28, 617-644.
- Howard, L., and Polich, J. (1985). P300 latency and memory span development. *Developmental Psychology*, 21, 283–289.
- Huang, H. J., & Mercer, V. S. (2001). Dual-task methodology: applications in studies of cognitive and motor performance in adults and children. *Pediatric Physical Therapy*, 13(3), 133-140.
- Hughes, C. (1998a). Executive function in preschoolers: Links with theory of mind and verbal ability. *British Journal of Developmental Psychology*, 16, 233–253.
- Hughes, C. (1998b). Finding your marbles: Does preschoolers' strategic behavior predict later understanding? *Developmental Psychology*, 34, 1326–1339.
- Hughes, C., (2011). Changes and challenges in 20 years of research into the development of executive function. *Infant and Child Development*, 20, 251-271.
- Hughes, C., Ensor, R., Wilson, A., & Graham, A. (2010). Tracking Executive Function Across the Transition to School: A Latent Variable Approach. *Developmental Neuropsychology*, 35, 20-36.
- Huizinga, M. & Van der Molen, M.W. (2007). Age-group differences in set-switching and set-maintenance on the Wisconsin Card Sorting Task. *Developmental Neuropsychology*, 31(2), 193-215.
- Huizinga, M., Dolan, C.V., & Van der Molen, M.W. (2006). Age-related change in executive function: Developmental trends and a latent variable analysis. *Neuropsychologia*, 44(11), 2017-2036.
- Hulme, C., Thomson, N., Muir, C. & Lawrence, A. (1984). Speech rate and the development of short-term memory span. *Journal of Experimental Child Psychology*, 38, 241-253.
- Humphreys, M.S., & Revelle, W. (1984). Personality, motivation, and performance: a theory of the relationship between individual differences and information processing. *Psychological Review*, 91, 153-184
- Hunter, W. S. (1913). The delayed reaction in animals and children. *Behavior Monographs*, 2, 1–86
- Hunter, W. S. (1917). The delayed reaction in a child. *Psychological Review*, xxiv, no. 1, 75-87.
- Huttenlocher, P., & Dabholkar, A. (1997). Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. *The Journal of Comparative Neurology*, 387, 167–178.
- Hutton, S., L. Sheppard, J. M. Rusted & H. H. Ratner (1996). Structuring the acquisition and retrieval environment to facilitate learning in individuals with dementia of the Alzheimer type. *Memory* 4, 113–130

- Istomina (1948/1977). The development of voluntary memory in preschool-age children. In M. Cole (Ed.), *Soviet Developmental Psychology* (pp.100-159). White plains, NY: Sharpe.
- Jacques, S., & Zelazo, P. D. (2005). Language and the development of cognitive flexibility: Implications for theory of mind. In J. W. Astington, & J. A. Baird (Eds.), *Why language matters for theory of mind* (pp. 144-162). New York: Oxford University Press.
- Jacques, S., Zelazo, P. D., Kirkham, N. Z., & Semcesen, T. K. (1999). Rule selection and rule execution in preschoolers: An error-detection approach. *Developmental Psychology, 35*, 770-780.
- Jarrold, C., Cowan, N., Hewes, A. K., & Riby, D.M. (2004). Speech timing and verbal short-term memory: Evidence for contrasting deficits in Down syndrome and Williams syndrome. *Journal of Memory and Language, 51*, 365–380.
- Jarrold, C., Hewes, A. K., & Baddeley, A. D. (2000). Two separate speech measures constrain verbal short-term memory in children. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 26*, 1626-1637.
- Johnson, J., Im-Bolter, N., & Pascual-Leone, J. (2003). Development of mental attention in gifted and mainstream children: The role of mental capacity, inhibition, and speed of processing. *Child Development, 74*, 1594-1614.
- Johnston, R.A. & Barry, C. (2006). Age of Acquisition and lexical processing: A review. *Visual Cognition, 13*, 789 -845
- Jones, L. B., Rothbart, M. K., & Posner, M. I. (2003). Development of executive attention in preschool children. *Developmental Science, 6*(5), 498-504.
- Jonides, J., Lacey, S.C., & Nee, D.E. (2005). Processes of working memory in mind and brain. *Current Directions in Psychological Science, 14*, 2-5.
- Jonides, J., Schumacher, E.H., Smith, E.E., Lauber, E.J., Awh, E., Minoshima, S., and Koeppel, R.A. (1997). Verbal-working-memory load affects regional brain activation as measured by PET. *Journal of Cognitive Neuroscience, 9*, 462-475.
- Juhasz, B. J. (2005). Age-of-Acquisition Effects in Word and Picture Identification. *Psychological Bulletin, Vol 131*(5), 684-712.
- Kagan, J. (1981). *The second year: The emergence of self-awareness*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Kagan, J., Baird, A.A. (2004) Brain and behavioral development during childhood and adolescence, In Gazzaniga, M.S. (Ed.), *The New Cognitive Neurosciences III* (pp.93-107). Cambridge, MA: MIT Press.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and Effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Kail, R. (2000). Speed of information processing: Developmental change and links to intelligence. *Journal of School Psychology, 38*, 51-61.
- Kail, R., & Hall, L. K. (2001). Distinguishing short-term memory from working memory. *Memory & Cognition, 29*, 1-9.
- Kail, R., & Park, Y. (1992). Global developmental change in processing time. *Merrill-Palmer Quarterly, 38*, 525-541.

- Kail, R., & Park, Y. (1994). Processing time, articulation time, and memory span. *Journal of Experimental Child Psychology*, 57, 281-291.
- Kane, M. J., & Engle, R. W. (2002). The role of prefrontal cortex in working-memory capacity, executive attention, and general fluid intelligence: An individual differences perspective. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9, 637-671.
- Kane, M. J., & Engle, R. W. (2003). Working memory capacity and the control of attention: The contributions of goal neglect, response competition, and task set to Stroop interference. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132, 47-70.
- Kane, M. J., Bleckley, M. K., Conway, A. R. A., & Engle, R. W. (2001). A controlled-attention view of working memory capacity: Individual differences in memory span and the control of visual orienting. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130, 169-183.
- Kane, M. J., Hambrick, D. Z., Tuholski, S. W., Wilhelm, O., Payne, T. W., & Engle, R. W. (2004). The generality of working-memory capacity: A latent-variable approach to verbal and visuo-spatial memory span and reasoning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133, 189-217.
- Keller, T., & Cowan, N. (1994). Developmental increase in the duration of memory for tone pitch. *Developmental Psychology*, 30, 855-863.
- Keppel, G., & Underwood, B. J. (1962). Proactive inhibition in short-term retention of single items. *Journal verbal Learning, verbal Behavior.*, 1962, 1, 153-161.
- King, J., & Just, M. A. (1991). Individual differences in syntactic processing: The role of working memory. *Journal of Memory and Language*, 30, 580-602.
- Kirkham, N.Z. , Cruess, L.M., & Diamond, A. (2003). Helping Children Apply their Knowledge to their Behavior on a Dimension-Switching Task. *Developmental Science*, 6(5), 449-467.
- Kirsch, W., Henninghausen, E. & Rösler, F. (2009). Dissociating cognitive and motor interference effects on kinesthetic short-term memory. *Psychological Research*, 73(3), 380-9. Kita & Özyürek, 2003
- Klingberg T, Forssberg H, Westerberg H (2002). Training of Working Memory in Children with ADHD. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 24(6): 781-791.
- Kray, J., & Lindenberger, U. (2000). Adult age differences in taskswitching. *Psychology & Aging*, 15, 126-147.
- Kusanagi, Y. (2005). Analysis of research on nonverbal communication in language education. *Paper presented at JALT2004, Conference Proceedings*, Tokyo.
- Lambert, E. & Chesnet, D. (2001). Novlex: une base de données lexicales pour les élèves de primaire. *L'Année Psychologique*, 101, 277-288
- Lansink, J.M, Mintz, S., & Richards, J.E. (2000). The distribution of infant attention during object examination. *Developmental Science*, 3, 163-170.
- Lau, P.-M. & Bi, G. Q. (2005) Synaptic mechanisms of persistent reverberatory activity in neuronal networks. *Proc Natl Acad Sci USA*, 102: 10333-10338.
- Lavenex P., Banta Lavenex P., (2006) Spatial relational memory in 9-month-old macaque monkeys. *Learning and Memory* 13(1), pp. 84-96.

- Lavenex P., Banta Lavenex P., Amaral D.G. (2007) Spatial relational learning persists following neonatal hippocampal lesions in macaque monkeys. *Nature Neuroscience* 10(2), pp. 234-239.
- Lavenex, P., Schenk, F. (1995). Influence of local environmental olfactory cues on place learning in rats. *Physiological Behavior*, 58: 1059 -1066.
- Lavenex, P., Schenk, F. (1997). Olfactory cues potentiate learning of distant visuospatial information. *Neurobiology Learning Memory*, 68:140 -153.
- Lavenex, P., Schenk, F.(1998) Olfactory traces and spatial learning in rats. *Anim. Behav.* 56:1129 -1136.
- Lavenex, P., Shiflett, M. W., Lee, R. K. & Jacobs, L. F. 1998. Spatial versus nonspatial relational learning in free-ranging fox squirrels (*Sciurus niger*). *Journal of Comparative Psychology*, 112, 127-136.
- Lawrence, B. M., Myerson, J., Oonk, H. M., & Abrams, R. A. (2001). The effects of eye and limb movements on working memory. *Memory*, 9, 433-444.
- Lehto, J.E., Juujarvi, P., Kooistra, L. & Pulkkinen, L. (2003). Dimensions of executive functioning: Evidence from children. *British Journal of Developmental Psychology*, 21, 59-80.
- Lété, B., Sprenger-Charolles, L., & Colé, P. (2004). MANULEX : A grade-level lexical database from French elementary-school readers . *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 36, 156-166.
- Levinson, D. B., Smallwood, J., & Davidson, R.J. (2012). The persistence of thought: Evidence for a role of working memory in the maintenance of task-unrelated thinking. *Psychological Science*, 23(4), 375-380
- Levy, B. J., & Anderson, M. C. (2002). Inhibitory processes and the control of memory retrieval. *Trends in Cognitive Science*, 6, 299–305.
- Lewandowsky, S., Duncan, M., & Brown, G.D.A. (2004). Time does not cause forgetting in short-term serial recall. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11, 771-790.
- Miller, G.A. (1956). The magical number seven, plus or minus two : Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63, 81-97.
- Lewandowsky, S., Oberauer, K., & Brown, G.D.A., (2009). No temporal decay in verbal short-term memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 13, 120-126 |
- Li, K. Z., Krampe, R. T., & Bondar, A. (2005). An ecological approach to studying aging and dual-task performance. In R. W. Engle,
- Liefooghe, B., Barrouillet, P., Vandierendonck, A., & Camos, V. (2008). Working memory costs of task switching. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 34, 478-494.
- Livesay, P. J., & Morgan, G. A. (1991). The development of response inhibition in 4- and 5-year-old children. *Australian Journal of Psychology*, 43, 133–137.
- Lloyd, M. E., Newcombe, N. S., & Doydum, A. (2009). Memory binding in early childhood: Evidence for a retrieval deficit. *Child Development*, 80, 1321-132

- Lloyd, M.E., Newcombe, N.S. & Doydum, A. (2009). Memory binding in early childhood: Evidence for a retrieval deficit. *Child Development, 80*, 1321-1328.
- Logie, R.H. (1995). Visuo-spatial working memory. Hove. UK: Erlbaum.
- Lövdén, M., Schaefer, S., Pohlmeier, A. E., & Lindenberger, U. (2008). Walking variability and working-memory load in aging: A dual-process account relating cognitive control to motor control performance. *Journal of Gerontology: Psychological Sciences, 63B*, P121-P128.
- Lucenet, J., Blaye, A., Kray, J., Chevalier, N. (2011). The Role of Goal Setting in the Development of Cognitive Flexibility in 6 and 7 year old: Does Verbalization help? Poster at Biennial Meeting of the Society for Research in Child Development, UK.
- Maccoby, E., & Hagen, J. W. (1965) Effects of distraction upon central versus incidental recall: Developmental trends. *Journal of Experimental Child Psychology, 2*, 280-289.
- MacDonald, M. C., Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1992). Working memory constraints on the processing of syntactic ambiguity. *Cognitive Psychology, 24*, 56–98.
- Macedonia, M. (2003). Sensorimotor enhancing of verbal memory through ‘Voice Movement Icons’ during encoding of foreign language. University of Salzburg: PhD Thesis.
- Mahone, E.M., Pillion J.P. & Hiemenz J.R., (2001). Initial development of an auditory continuous performance test for preschoolers. *Journal of attention disorders, 5*, 93-106.
- Maintenant, C., & Blaye, A. (2008). Développement de la flexibilité catégorielle de 3 à 8 ans : Rôle des aspects conceptuels. *L'Année Psychologique, 108*, 659-698.
- Marcovitch, S., Boseovski, J. J., & Knapp, R. (2007). Use it or lose it: Examining preschoolers' difficulty in maintaining and executing a goal. *Developmental Science, 10*, 559-564.
- Marcovitch, S., Boseovski, J. J., Knapp, R. J., & Kane, M. J. (2010). Goal neglect and working memory capacity in 4- to 6-year-old children. *Child development, 81(6)*, 1687-95.
- Masson, M. E. J. (2011). A tutorial on a practical Bayesian alternative to null-hypothesis significance testing. *Behavior Research Methods, 43*, 679-690.
- Masumoto, K., M. Yamaguchi, K. Sutani, S. Tsuneto, A. Fujita & M. Tonoike (2006). Reactivation of physical motor information in the memory of action events. *Brain Research 1101*, 102–109.
- Matthews, A., Ellis, A. E., & Nelson, C. A. (1996). Development of preterm and full-term infant ability on AB, recall memory, transparent barrier detour, and means–end tasks. *Child Development, 67*, 2658–2676.
- Mayringer H, Wimmer H (2000). Pseudonym learning by Germanspeaking children with dyslexia: Evidence for a phonological learning deficit. *Journal of Experimental Psychology, 75*, 116-133.
- McClelland, M. M., Cameron, C. E., Connor, C. M., Farris, C. L., Jewkes, A. M., & Morrison, F.J. (2007). Links between behavioral regulation and preschoolers' literacy, vocabulary, and math skills. *Developmental Psychology, 43*, 947-959.

- McEvoy, R. E., Rogers, S. J., & Pennington, B. F. (1993). Executive function and social communication deficits in young autistic children *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 34, 563–578.
- McLean, J.F. & Hitch, G.J. (1999). Working memory impairments in children with specific arithmetic learning difficulties. *Journal of Experimental Child Psychology*, 74, 240-260.
- McMorris, T., & Graydon, J. (2000). The effect of incremental exercise on cognitive performance. *International Journal of Sport Psychology*, 31, 66–81.
- Mecklenbräucker, Steffens, Jelenec & Goergens, 2011 ;
- Miller, G.A. (1956). The magical number seven, plus or minus two : Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63, 81-97.
- Miller, G.A., Galanter, E., & Pribram, H.K. (1960). *Plans and the structure of behavior*. New York: Holt, Rinehart & Winston
- Miyake, A., & Shah, P. (1999), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Miyake, A., Emerson, M.J., Padilla, F., & Ahn, J. (2004). Inner speech as a retrieval aid for task goals: The effects of cue type and articulatory suppression. *Acta Psychologica*, 115, 123–142.
- Miyake, A., Friedman, N.P., Emerson, M.J., Witzki, A.H., Howerter, A., Wager, T. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41, 49–100.
- Monsell, S. (1991). The nature and locus of word frequency effects in reading. In D. Besner & G.W. Humphreys (Eds), *Basic processes in reading: Visual word recognition* (pp. 148±197). Hove: Erlbaum.
- Moray, N. (1959). Attention in dichotic listening: Affective cues and the influence instructions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 11, 56–60.
- Morsella, E., & Krauss, R. M. (2004). The role of gestures in spatial working memory and speech. *American Journal of Psychology*, 117, 411–424.
- Mosier, C. E. & Rogoff, B. (1994). Infants' instrumental use of their mothers to achieve their goals. *Child Development*, 65, 70-79.
- Mueller, S. T., Seymour, T. L., Kieras, D. E., & Meyer, D. E. (2003). Theoretical implications of articulatory duration, phonological similarity, and phonological complexity on verbal working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 29, 1353-1380
- Nadar, M. S. & J. McDowd. 2008. 'Show me, don't tell me'; is this a good approach for rehabilitation? *Clinical Rehabilitation* 22, 847–855.
- Nagy Z., Westerberg H., Klingberg T. (2004). Maturation of white matter is associated with the development of cognitive functions during childhood. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(7), 1227-1233.
- Nairne, J. S. (1990). A feature model of immediate memory. *Memory & Cognition*, 18(3), 251-269.

- Norman, W., & Shallice, T. (1986). Attention to action. In: Davidson RJ, Schwartz GE, Shapiro D, editors. *Consciousness and self-regulation: Advances in research and theory, vol. 4*. New York: Plenum, p 1–18.
- Oakes, L.M., Horst, J.S., Kovack-Lesh, K.A., Perone, S. (2008). How infants learn categories. In A. Woodward & A. Needham (Eds.) *Learning and the infant mind* (pp. 144-171). New York: Oxford University Press.
- Oberauer, K. (2002). Access to information in working memory: Exploring the focus of attention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 28, 411-421.
- Oberauer, K. (2005). Control of the contents of working memory - a comparison of two paradigms and two age groups. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 31, 714-728.
- Oberauer, K., & Lewandowsky, S. (2008). Forgetting in immediate serial recall: Decay, temporal distinctiveness, or interference? *Psychological Review*, 115, 544-576.
- Oldfield, R. C., & Wingfield, A. (1964). The time it takes to name an object. *Nature* 202:1031–1032.
- Oldfield, R. C., & Wingfield, A. (1965). Response latencies in naming objects. *Quart J. Exp. Psychol.* 17:273–281.
- Osaka, M., Osaka, N., Kondo, H., Morishita, M., Fukuyama, H., Aso, T., & Shibasaki, H. (2003). The neural basis of individual differences in working memory capacity: An fMRI study. *NeuroImage*, 18, 789-797.
- Page, M.P.A. & Norris, D. (1998) *The primacy model: a new model of immediate serial recall*, *Psychological Review*, 105 (4), 761-781, 1998.
- Palmer, S. E. (2000). Working Memory: A developmental study of phonological recoding, *Memory*, 8:3, 179-193.
- Park, D.C., Lautenschlager, G., Hedden, T., Davidson, N.S., Smith, A.D., Smith, P.K. (2002) Models of visuospatial and verbal memory across the adult life span. *Psychology Aging* 17:299–320.
- Pascual-Leone A. (2005). Repetitive transcranial magnetic stimulation and Migraine. *Journal Watch – NEJM*, 3(7):23-24.
- Pascual-Leone, J. (1970). A mathematical model for the transition rule in Piaget's developmental stages. *Acta Psychologica*, 32, 301–345.
- Pelphrey KA & Reznick JS (2002). Working memory in infancy. *Advances in Child Development and Behavior*, 31: 173-227.
- Pelphrey, K. A., & Reznick, J. S. (2003). Working memory in infancy. In R. Kail (Ed.), *Advances in child development and behavior* (Vol. 31, pp. 173-227). New York: Academic Press.
- Pennington, B.F. (1994). The working memory function of the prefrontal cortices. In M.M. Haith, J.B. Benson, R.J. Roberts Jr, & B.F. Pennington (Eds). *The development of future-oriented processes* (pp. 243-289). Chicago: University of Chicago Press.

- Pennington, B.F. (1997). Dimensions of executive functions in normal and abnormal development. In N. Krasnegor, G. Lyon, & P. Goldman-Rakic (Eds.), *Development of the prefrontal cortex: Evolution, neurobiology, and behavior* (pp.265-282). Baltimore; Brookes Publishing.
- Pereira, E. M. ; Santos, F. A. P. ; Bittar, C. M. M. ; Ramalho, T. R. ; Costa, D. F. A. ; Martinez, J. C., (2007). Substitution of corn grain by wheat middlings or corn gluten feed in the finishing bulls diet. *Acta Scientiarum - Animal Sciences*, 29 (1): 49-55.
- Perry, M., Berch, D., & Singleton, J. L. (1995). Constructing shared understanding: The role of nonverbal input in learning contexts. *Journal of Contemporary Legal Issues*, 6, 213-236.
- Peterson, L. R., & Peterson, M. J. (1959). Short-term retention of individual verbal items. *Journal of Experimental Psychology*, 58, 193-198.
- Petrides, M. (1995). Impairments on nonspatial self-ordered and externally ordered working memory tasks after lesions of the mid-dorsal part of the lateral frontal cortex in the monkey. *Journal of Neuroscience*, 15, 359-375.
- Peyrin, L., Pequignot, J.M., Lacour, J.R. and Fourcade, J. (1987). Relations between catecholamines or 3-methoxy 4-hydroxy phenylglycol changes and the mental performance under submaximal exercise in men. *Psychopharmacology*, 93, 188–192.
- Piaget, J. (1924). *Le jugement et le raisonnement chez l'enfant*. Neuchâtel, Paris: Delachaux et Niestlé
- Piaget, J. (1941). *La genèse du nombre chez l'enfant*. Neuchâtel, Paris: Delachaux et Niestlé.
- Piaget, J. (1952). *The origins of intelligence in children*. New York: International Universities Press.
- Piaget, J. (1954/1981). Intelligence and affectivity: Their relation during child development. Palo Alto, CA: Annual Reviews.
- Ping, R. & Goldin-Meadow, S. (2008). Hands in the air: Using ungrounded iconic gestures to teach children conservation of quantity. *Developmental Psychology*, 44(5), 1277
- Polich, J., Howard, L., & Starr, A. (1985). Aging effects on the P300 component of the event-related potential from auditory stimuli: peak definition, variation and measurement. *Journal of Gerontology*, 40, 721-926.
- Portrat, S., Camos, V., & Barrouillet, P. (2010). Motor programming disrupts verbal maintenance. *Revista Portuguesa de Pedagogia & Psychologia*, 30, 75-84.
- Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (1998). Attention, self-regulation, and consciousness. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B*, 353, 1915-1927.
- Posner, M.I. (2004). The achievements of brain imaging: Past and present. To appear in N. Kanwisher & J. Duncan (Eds.), *Attention and Performance XX*, Oxford University Press (pp. 505-528).
- Posner, M.I. & Fan, J. (2004). Attention as an Organ System. James R. Pomerantz and Michael C. Crair, Eds. *Topics in Integrative Neuroscience: From Cells to Cognition*. Cambridge UK: Cambridge University Press.

- Postle, B.R., Idzikowski, C., Della Sala, S., Logie, R.H. & Baddeley, A.D. (2006) The selective disruption of spatial working memory by eye movements. *Quarterly Journal of Psychology A*, 59(1), 100-120.
- Postman, L., and Phillips, L. W. (1965). Short term temporal changes in free recall. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 17, 132-138.
- Pressley, M., & Hilden, K. (2006). Cognitive strategies: Production deficiencies and successful strategy instruction everywhere. In D. Kuhn & R. Siegler (Eds.), *Handbook of child psychology (Vol. 2)*. Hoboken, NJ: Wiley.
- Purser, H. R. M. & Jarrold, C. (2010). Short- and long-term memory contributions to immediate serial recognition: Evidence from serial position effects. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63, 679-693.
- Quinn, J. G. and G. E. Ralston (1986). "Movement and attention in visual working memory." *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 38A: 689-703.
- Quinn-Allen, L. (1995). The effects of emblematic gestures on the development and access of mental representations of French expressions. *The Modern Language Journal* 79, 521–529.
- Rayner, K. (1977). Visual attention in reading: Eye movements reflect cognitive processes. *Memory & Cognition*, 5, 443-448.
- Reese, H. W. (1999). Strategies for replication research exemplified by replications of the Istimina Study. *Developmental Review*, 19, 1–30
- Reznick, J. S. (2009). *Working Memory in Infants and Toddlers*. N. Cowan and M. Courage (Eds.), *The development of memory in infancy and childhood* (Psychology Press).
- Reznick, J. S., Chawarska, K., Betts, S. L., & Logan, B. (1997). A simple system for monitoring the timing of infant gaze to stimuli at specific locations. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 29, 528-533.
- Reznick, J. S., Fueser, J. J., & Bosquet, M. (1998). Self-corrected reaching in a three-location delayed-response search task. *Psychological Science*, 9, 65-69.
- Reznick, J. S., Morrow, J. D., Goldman, B. D., & Snyder, J. (2004). The onset of working memory in infants. *Infancy*, 6, 145-154.
- 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), pp. 1-29.
- Richards, J.E. (1989). Development and stability in heart-rate-defined, visual sustained attention in 14, 20, and 26 week old infants. *Psychophysiology*, 26, 422-430
- Richards, J.E. (1989). Sustained visual attention in 8-week-old infants. *Infant Behavior and Development*, 12, 425-436.
- Richards, J.E., & Casey, B.J. (1991). Heart rate variability during attention phases in young infants. *Psychophysiology*, 28, 43-53

- Rothbart, M. K., & Posner, M. I. (2001). *Mechanism and variation in the development of attentional networks*. In C. A. Nelson & M. Luciana, (Eds.), *Handbook of developmental cognitive neuroscience*. (pp. 353-363). Cambridge, MA: MIT Press.
- Ruff, H. A., & Rothbart, M. K. (1996). *Attention in early development: Themes and variations*. New York: Oxford University Press.
- Rusted, J. M. 2003. Action based memory in Alzheimer's disease. *Research and Practice in Alzheimer's Disease* 7, 103–107.
- Rypma, B., Prabhakaran, V., Desmond, J. E., Glover, G. H., & Gabrieli, J. D. E. (1999). Load-dependent roles of frontal brain regions in the maintenance of working memory. *NeuroImage*, 9, 216-226.
- Saltz, E. & Donnenwerthnolan, S. (1981). Does motoric imagery facilitate memory for sentences — a selective interference test. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 20, 322–332.
- Saults, J. S., & Cowan, N. (1996). The development of memory for ignored speech. *Journal of Experimental Child Psychology*, 63, 239–261.
- Schaefer, S., & Lindenberger, U. (2013). Thinking while walking: Experienced high-heel walkers flexibly adjust their gait. *Frontiers in Psychology*, 4:316.
- Schaefer, S., Krampe, R. Th., Lindenberger, U., & Baltes, P. B. (2008). Age differences between children and young adults in the dynamics of dual-task prioritization: Body (balance) vs. mind (memory). *Developmental Psychology*, 44, 747-757
- Schaefer, S., Lövdén, M., Wieckhorst, B., & Lindenberger, U. (2010). Cognitive performance is improved while walking: Differences in cognitive-sensorimotor couplings between children and young adults. *European Journal of Developmental Psychology*, 7, 371-389
- Schatz T.R., Spranger T., Kubik V., & Knopf M. (2011). Exploring the enactment effect from an information processing view: What can we learn from serial position analyses? In : *Scandinavian Journal of Psychology*, vol.52, n° 6, 2011, p.509-515
- Scheibel, R. S., & Levin, H. S. (1997). Frontal lobe dysfunction following closed head injury in children: Findings from neuropsychology and brain injury. In N. A. Krasnegor, G.R. Lyon & P.S. Glodman-Rakic (Eds), *Development of the prefrontal cortex: Evolution, neurobiology and behavior*, 241-263. Baltimore: Brookes.
- Schneider, J.F., Il'yasov K.A., Hennig J., Martin, E. (2004). Fast quantitative diffusion-tensor imaging of cerebral white matter from the neonatal period to adolescence. *Neuroradiology*, 46(4): 258-266.
- Schneider, W., & Brun, H. (1987). The role of context in young children's memory performance: Istomina revisited. *British Journal of Developmental Psychology*, 5(4), 333-341.
- Schneider, W., & Pressley, M. (1997). *Memory development between two and twenty* (2nd ed.). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Seibert, J.M., Hogan, A.E., & Mundy, P.C. (1982). Assessing interactional competencies: The Early Social-Communication Scales. *Infant Mental Health Journal*, 3, 244 - 245.

- Shallice, T. & Burgess, P.W. (1991). Deficits in strategy application following frontal lobe damage in man. *Brain*, 114, 727–741.
- Shallice, T. (1982). Specific impairments of planning. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, 298, 199-209.
- Siegel, L.S. & Ryan, E.B. (1989). The development of working memory in normally achieving and subtypes of learning disabled children. *Child Development*, 60, 973-980.
- Siegler, R. S. (1996). *Emerging minds: The process of change in children's thinking*. New York: Oxford University Press.
- Simmering V. R., Perone S. (2013). Working memory capacity as a dynamic process. *Frontiers in Psychology*, 3: 567.
- Simpson, A., & Riggs, K. J. (2005a). Inhibitory and working memory demands of the day-night task in children. *British Journal of Developmental Psychology*, 23, 317–333.
- Simpson, A., & Riggs, K. J. (2007). Under what conditions do young children have difficulty inhibiting manual actions?. *Developmental Psychology*, 43(2), 417-428. doi:10.1037/0012-1649.43.2.417
- Smith, E.E. and Jonides, J. (1999). Storage and executive processes in the frontal lobes. *Science*, 283, 1657-1661.
- Smith, E.E., and Jonides, J. (1997). Working memory: A view from neuroimaging. *Cognitive Psychology*, 33, 5-42
- Smith, E.E., Jonides, J., and Koeppel, R.A. (1996). Dissociating verbal and spatial working memory using PET. *Cerebral Cortex*, 6, 11-20
- Smith, M. M., & Scholey, K. A. (1992). Determining spatial span: The role of movement time and articulation rate. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 45A, 479-501.
- So, W. C., Chen-Hui, C. S., & Wei-Shan, J. L. (2012). Mnemonic effect of iconic gesture and beat gesture in adults and children: Is meaning in gesture important for memory recall. *Language and Cognitive Processes*, 27, 5.
- Somsen R. (2007). The development of attention regulation in the Wisconsin Card Sorting Task. *Developmental science* 10 (5), 664-80.
- Spranger, T., Schatz, T.R., Knopf, M. (2008) Does action make you faster? A retrieval-based approach to investigating the origins of the enactment effect. *Scandinavian Journal of Psychology*, Vol.49(6), p.487(9)
- Spring, C., Capps, C. (1974). Encoding speed, rehearsal, and probed recall of dyslexic boys. *Journal of Educational Psychology*, 66, 780-786.
- St Clair-Thompson, H.L. (2012). Ascending versus randomised list lengths in working memory span tasks. *Journal of Cognitive Psychology*, 24, 335-341
- St Clair-Thompson, H.L., Gathercole, S. (2006). Executive functions and achievements in school: Shifting, updating, inhibition, and working memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59 (4), 745–759

- Stevanoni, E. & Salmon, K. (2005). Giving memory a hand: Instructing children to gesture enhances their event recall. *Journal of Nonverbal Behavior*, 29, 217-233.
- Stroop, J.R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18 (6), 643–662
- Swanson HL, Ashbaker MH, Lee C. (1996). Learning disabled readers working memory as a function of processing demands. *Journal of Experimental Child Psychology*, 61:242–275.
- Swanson, H. L., Beebe-Frankenberger, M. (2004). The relationship between working memory and mathematical problem solving in children at risk and not at risk for serious math difficulties. *Journal of Educational Psychology*, 96 (3), 471-491.
- Swanson, H.L., (1994). Short-term memory and working memory – Do both contribute to our understanding of academic achievement in children and adults with learning disabilities? *Journal of Learning Disabilities*, 27, 34-50.
- Swanson, H.L., (2003). Age-related differences in learning disabled and skilled readers' working memory. *Journal of Experimental Child Psychology*, 85, 1-31.
- Swanson, H.L., Cooney, J.B., & Brock, S. (1993). The influence of working memory and classification ability on children's word problem solution. *Journal of Experimental Child Psychology*, 55, 374-395.
- Swanson, H.L., Howell, M. (2001). Working memory, short-term memory and speech rate as predictors of children's reading performance at different ages. *Journal of Educational Psychology*, 93, 720-734.
- Swanson, H.L., Sachse-Lee, C. (2001). Mathematical problem solving and working memory in children with learning disabilities: Both executive and phonological processes are important. *Journal of Experimental Child Psychology*, 79:294-321.
- Taleghani-Nikazm, C. 2008. Gestures in foreign language classrooms: An empirical analysis of their organization and function. In Melissa Bowles et al. (eds.), *Selected Proceedings of the 2007 Second Language Research Forum*, 229–238. Somerville, MA: Cascadilla Proceedings Project.
- Tam, H. H. Y., 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, p. 306 – 324.
- Tellier, M. 2008. The effect of gestures on second language memorisation by young children. *Gesture* 8, 219–235.
- Thevenot, C., Oakhill, J. (2005). The strategic use of alternative representations in arithmetic word problem solving. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 58A, 1311-1323.
- Tomprowski, P. D. (2003). Effects of acute bouts of exercise on cognition. *Acta Psychologica*, 112(3), 297–324.
- Towse, J. N. , Hitch, G. J., & Hutton, U. (2000). On the interpretation of working memory span in adults. *Memory and Cognition*, 28(3), 341-348

- Towse, J. N., Lewis, C., & Knowles, M. (2007). When knowledge is not enough: The phenomenon of goal neglect in preschool children. *Journal of Experimental Child Psychology, 94*, 18–26
- Towse, J. N., Redbond, J., Houston-Price, C. M. T. & Cook, S. (2000). "Understanding the Dimensional Change Card Sort: Perspectives from task success and failure." *Cognitive Development, 15*(3), 347-365.
- Towse, J.N. & Hitch, G.J. (1995). Is there a relationship between task demand and storage space in tests of working memory capacity? *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 48*, 108–124.
- Towse, J.N. & Hitch, G.J. (2007). Variation in working memory due to normal development. In Jarrold, C., Miyake, A., Towse, J.N., *Variation in Working Memory*, pp. 109-133. New York: Oxford University Press.
- Towse, J.N., Hitch, G.J. & Hutton, U. (1998). A re-evaluation of working memory capacity in children. *Journal of Memory & Language, 39*, 195-217.
- Turner, M. L., & Engle, R. W. (1989). Is working memory capacity task dependent? *Journal of Memory and Language, 28*, 127–154.
- Unsworth N., & Engle, R.W. (2007). On the division of short-term and working memory: An examination of simple and complex spans and their relation to higher-order abilities. *Psychological Bulletin, 133*, 1038-1066.
- Valenzeno, L., Alibali, M. A., & Klatzky, R. (2003). Teachers' gestures facilitate students' learning: A lesson in symmetry. *Contemporary Educational Psychology, 28*(2), 187-204.
- Vaughan, A.L. & Giovanello, K.S. (2010). Executive function in daily life: Age-related influences of executive processes on instrumental activities of daily living. *Psychology and Aging, 25*, 343-355.
- Vergauwe, E., Barrouillet, P., & Camos, V. (2010). Do mental processes share a domain-general resource? *Psychological Science, 21*(3), 384-390.
- Verhaeghen, P. (2012). Working memory still working: Age-related differences in working memory and executive control. In N. Ohta & M. Naveh-Benjamin (Eds.), *Memory and aging* (p. 3-30). Psychology Press.
- Vitiello, V., Greenfield, D.B, Munis, P. & George, J. (2011) Cognitive Flexibility, Approaches to Learning, and Academic School Readiness in Head Start Preschool Children. *Early Education & Development 22*(3): 388-410.
- Vuillerme, N., & Nougier, V. (2004). Attentional demands for regulating postural sway: The effect of expertise in gymnastics. *Brain Research Bulletin, 63*: 161-165
- Wagenmakers, E.-J. (2007). A practical solution to the pervasive problems of *p* values. *Psychonomic Bulletin & Review, 14*, 779-804.
- Wagner, R.K., Muse, A. (2006). Working memory deficits in developmental dyslexia. In TP Alloway, TP, SE Gathercole (Eds), *Working memory in neurodevelopmental conditions*. Psychology Press.

- Wagner, R.K., Torgesen, J.K., Rashotte, C.A., Hecht, S.A., Barker, T.A., Burgess, S.R., Donahue, J., & Garon, T. (1997). Changing relations between phonological processing abilities and word level reading as children develop from beginning to skilled readers: A 5-year longitudinal study. *Developmental Psychology, 33*, 468-479.
- Waugh, N. C. & Norman, D. A. (1965). Primary memory. *Psychological Review, 72*, 89-104.
- Weissberg, J. A., & Paris, S. G. (1986). Young children's remembering in different contexts: A reinterpretation of Istomina's study. *Child Development, 57*, 1123-1129.
- Wellman, H. M. (1988). *The early development of memory strategies*. In F. E. Weinert & M. Perlmutter (Eds.), *Memory development: Universal changes and individual differences*. Hillsdale, NJ: Erlbaum Associates.
- Wellman, H. M., Ritter, K., & Flavell, J. H. (1975). Deliberate memory behavior in the delayed reactions of very young children. *Developmental Psychology, 11*, 780-787.
- Welsh, M. C., Pennington, B. F., & Groisser, D. B. (1991). A normative-developmental study of executive function: A window of prefrontal function in children. *Developmental Neuropsychology, 7*, 131-149.
- Wesp, R., Hesse, J., Keutmann, D., & Wheaton, K. (2001). Gestures maintain spatial imagery. *The American Journal of Psychology, 114*, 591-600.
- Whitall, Jill (1991) The developmental effect of concurrent cognitive and locomotor skills: time-sharing from a dynamical perspective. *Journal of Experimental Child Psychology, 51*, (2), 245-266.
- Wickens, C. D. (1991). *Processing resources and attention*. In D. Damos (Ed.), *Multiple-task performance* (pp. 3-34). London: Taylor & Francis.
- Wiebe, S. A., Espy, K. A., & Charak, D. (2008). Using confirmatory factor analysis to understand executive control in preschool children: I. Latent structure. *Developmental Psychology, 44*, 575-587.
- Wiebe, S. A., Sheffield, T. D., Nelson, J. M., Clark, C. A. C., Chevalier, N., & Espy, K. A. (2011). The structure of executive function in 3-year-old children. *Journal of Experimental Child Psychology, 108*, 436-452. "Executive Function" Special Issue.
- Willatts P. 1984. The stage-IV infant's solution of problems requiring the use of supports. *Infant Behavior and Development 7*: 125-134.
- Willatts, P. (1999). Development of means-end behavior in young infants: Pulling a support to retrieve a distant object. *Developmental Psychology, 35*, 651-667.
- Willoughby, M. T., Kupersmidt, J. B., & Voegler-Lee, M. E. (2012). Is Preschool Executive Function Causally Related to Academic Achievement? *Child Neuropsychology, 18*(1), 79-91
- Wolfe, C. D., & Bell, M. A. (2004). Working memory and inhibitory control in early childhood: Contributions from physiology, temperament, and language. *Developmental Psychobiology, 44*, 68-83.
- Wolfe, C.D., & Bell, M.A. (2007). Sources of variability in working memory in early childhood: A consideration of age, temperament, language, and brain electrical activity. *Cognitive Development, 22*, 431-455.

- Yuill, N., Oakhill, J.V. & Parkin, A. (1989). Working memory, comprehension ability and the resolution of text anomaly. *British Journal of Psychology*, 80,351-361.
- Zelazo, P. D. (1996). Towards a characterization of minimal consciousness. *New Ideas in Psychology*, 14, 63-80.
- Zelazo, P. D., Carter, A., Reznick, J. S., & Frye, D. (1997). Early development of executive function: A problem-solving framework. *Review of General Psychology*, 1, 198–226.
- Zelazo, P. D., Frye, D. & Rapus, T. (1996). An age-related dissociation between knowing rules and using them. *Cognitive Development*, 11, 37-63.
- Zelazo, P. D., M"uller, U., Frye, D., & Marcovitch, S. (2003). The development of executive function in early childhood. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 68 (3, Serial No. 274).
- Zimmer H.D. & Cohen (2001). Remembering actions: A specific type of Memory. In H. D. Zimmer, R. Cohen, J. M. J. Guynn, R. Engelkamp & M. A. Foley (eds.), *Memory for Action: A Distinct form of episodic memory*, 3-24. New York: Oxford University Press.
- Zimmer, H. (2001a). Why do Actions speak louder than words. Action memory as a variant of encoding manipulations or the result of a specific memory system? In H. D. Zimmer, R. Cohen, J. M. J. Guynn, R. Engelkamp & M. A. Foley (eds.), *Memory for Action: A Distinct form of episodic memory*, 151–198. New York: Oxford University Press.
- Zhang, W., & Luck, S. J. (2009). Sudden Death and Gradual Decay in Visual Working Memory. *Psychological Science*, 20(4), 423-428