



UNIVERSITÉ DE FRIBOURG
UNIVERSITÄT FREIBURG

**EVOLUTION DEVELOPPEMENTALE DES MECANISMES DE
MAINTIEN DE L'INFORMATION VERBALE EN MEMOIRE DE
TRAVAIL ENTRE 6 ET 9 ANS**

Thèse de Doctorat présentée devant la Faculté des lettres de l'Université de Fribourg (Suisse)

sous la direction de la professeure Valérie Camos

par

Anne-Laure Oftinger (France)

2015

Approuvé par la Faculté des lettres sur proposition des professeurs :

Valérie Camos (première rapporteure),

Edouard Gentaz (deuxième rapporteur).

Fribourg, le 29 Septembre 2015.

Prof. Roberto Caldara, président du colloque de doctorat

La Doyenne Prof. Bernadette Charlier

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à celle sans qui cette thèse ne serait pas, la Professeure Valérie Camos. Merci pour votre disponibilité, votre dynamisme et votre empathie. Merci pour votre accompagnement et votre rigueur tout au long de cette thèse et pour les relectures appliquées de ce manuscrit. Ce fut une expérience très riche grâce à vous.

Je souhaite également adresser tous mes remerciements à l'ensemble des membres du jury, le Professeur Édouard Gentaz, professeur à l'Université de Genève, qui a accepté d'évaluer ce travail de thèse, les Professeures Geneviève Petitpierre et Chantal Martin-Sölch qui ont accepté de faire partie de mon jury de thèse, et le Professeur Roberto Caldara qui a accepté de présider le colloque de doctorat. Je tiens également à remercier spécifiquement le Professeur Édouard Gentaz pour m'avoir donné envie de faire de la recherche.

Cette thèse portant sur les enfants âgés de 6 à 9 ans, elle ne sera bien évidemment pas la même sans leurs participation toujours exemplaire et pleine de motivation. Je les remercie chaleureusement, ainsi que leurs parents. L'ensemble de ces études s'est déroulé dans les écoles. Je tiens par conséquent à remercier Mme Chassot qui était directrice de l'instruction publique, de la culture et du sport jusqu'en novembre 2013, M. Siggen, qui a repris sa succession, M. Dessibourg, qui était chef adjoint du Service de l'enseignement obligatoire de langue française jusqu'en novembre 2013, M. Bouquet qui a repris sa succession et M. Oberson, adjoint du chef de service, qui nous ont permis l'accès aux écoles du canton de Fribourg. Merci à Mr Boil pour l'accès à une classe de Porrentruy (JU). Un grand merci également à Mme Diaz, directrice adjointe du cycle 1 de La Chaux-de-Fonds pour sa rapidité et son efficacité lors de tous nos échanges. Un grand merci également aux inspectrices et inspecteurs d'arrondissements, responsables d'établissement, aux enseignantes et aux enseignants pour leur accueil dans leur classe et leur établissement [Estavayer-le-lac, Bulle-Morlon (La Léchère, La condémine centre, sud et nord ; et la Tour-de-Trême), Romont, Châtel St Denis, Cormanon, Attalens, Courtepin, Fribourg (Jura et Vignettaz) Porrentruy et La Chaux-de-Fonds]. Merci aux étudiant(e)s de Bachelor et Master qui ont participé à ces passations et m'ont permis de tester des groupes d'enfants conséquents.

Je souhaite remercier l'ensemble des personnes de l'Université de Fribourg que j'ai pu côtoyer durant cette thèse. Je pense notamment, aux équipes passées et présentes de Clinique, de Neurosciences et de la PPSA. Je remercie plus particulièrement Romina pour son soutien

sans faille, Cricri pour sa disponibilité et son aide précieuse notamment lors de la rédaction de ce manuscrit et Helen pour son soutien et son aide en anglais. Je remercie les membres de l'équipe travaillant sur le modèle du TBRS, en particulier Gérôme, Lucie et Raphaëlle pour leur bonne humeur à chaque rencontre et merci Gérôme pour tes astuces sur Psyscope. Bien évidemment je remercie les membres passés et présents de notre petite mais soudée équipe du LCD. Merci infiniment à Vanessa pour sa bonne humeur, nos discussions et son aide précieuse en anglais, merci Philou pour tous ces moments de complicité et surtout merci à toi Benoît pour avoir entre autre réussi à me supporter pendant ces années de thèse. Je suis vraiment heureuse d'avoir partagé cette étape de ma vie avec toi. Je te souhaite le meilleur pour le futur autant sur le plan professionnel que personnel.

Mes derniers remerciements et non les moindres, vont s'adresser à ma famille et mes ami(e)s. Merci pour vos encouragements, votre écoute et votre présence. En particulier, merci à mes parents, à Céline, à Caro, à mes frères, à mes petits cobayes, Marine, Anaïs, Alys et Alexis et merci à toi, Perrine pour ton aide et ton soutien fidèle depuis tant d'années. Je tiens également à te remercier Fred pour m'avoir montré le chemin du doctorat, mais surtout pour avoir toujours cru en moi et pour m'avoir toujours poussé à aller de l'avant tout en gardant ton regard protecteur de grand frère. Je ne pourrais clore ces remerciements sans citer celui qui n'a pas hésité à me suivre dans cette aventure en Suisse et qui a fini par se lancer dans sa propre aventure de thèse. Merci pour tout... Mathieu.

Résumé

La mémoire de travail permet le stockage temporaire d'informations et leur traitement. Pour maintenir de l'information verbale en mémoire de travail nous utilisons, en tant qu'adulte, deux mécanismes, la répétition articulatoire et le rafraîchissement attentionnel. Nous sommes capables d'utiliser ces deux mécanismes indépendamment et de façon additive. Les enfants utiliseraient ces deux mécanismes dès l'âge de 7 ans. Ce travail de thèse avait pour objectif de compléter la seule étude portant sur le développement conjoint de ces deux mécanismes, celle de Tam et al. (2010). Dans le but d'évaluer le développement conjoint des deux mécanismes autour de l'âge charnière de 7 ans, ces expériences ont porté sur des enfants âgés de 6 à 9 ans. Les résultats obtenus confirment que les mécanismes de répétition articulatoire et de rafraîchissement attentionnel peuvent être utilisés par les enfants dès l'âge de 7 ans. La répétition articulatoire serait même disponible avant l'âge de 7 ans, remettant en question l'hypothèse d'un changement qualitatif à 7 ans. En effet, dès 6 ans les enfants utilisent des stratégies de maintien et sont sensibles à l'effet de similarité phonologique. Les résultats des trois études menées ne dévoilent aucune interaction entre la manipulation de l'utilisation du rafraîchissement attentionnel et celle de la répétition articulatoire. En accord avec les résultats obtenus chez l'adulte, ces deux mécanismes sont donc indépendants chez l'enfant dès l'âge de 6 ans.

Mots clés : mémoire de travail, mécanismes de maintien, répétition articulatoire, rafraîchissement attentionnel, développement.

.....

Abstract

Working memory allows temporary storage of information and processing. To maintain verbal information in working memory adults use two mechanisms, articulatory rehearsal and attentional refreshing. We are able to use these two mechanisms independently and additively. Children can use these two mechanisms from the age of 7 years. This research work aimed at completing the only study on the joint development of these two mechanisms by Tam et al (2010). These experiments have focused on children between 6 and 9 years old to assess the joint development of two mechanisms around the pivotal age of 7 years. The results confirmed that children as young as 7 years old can use these mechanisms. Articulatory rehearsal was even available before the age of 7 years, challenging the hypothesis of a qualitative change at 7. Indeed, from 6-year-old children used maintenance strategies and were sensitive to the effect of phonological similarity. The results of three studies do not indicate any interaction between the manipulation of attentional refreshing and articulatory rehearsal. Consistent with the results obtained in adults, both mechanisms are independent in children as young as 6 years old.

Keywords: Working memory, maintenance mechanisms, articulatory rehearsal, attentional refreshing, development.

Table des matières

Introduction	1
CHAPITRE I: PARTIE THEORIQUE	3
I.1. LA MEMOIRE DE TRAVAIL.....	3
I.1.1. Mémoire de Travail et Mémoire à Court terme.....	3
I.1.2. Empan mnésique.....	4
I.1.3. Tâches spécifiques de la mémoire de travail	5
I.2. LES DIFFERENTS MODELES DE MEMOIRE DE TRAVAIL	7
I.2.1. Conception multidimensionnelle	7
<i>Modèle à composantes multiples de Baddeley.....</i>	<i>7</i>
<i>Les différentes composantes.....</i>	<i>8</i>
I.2.2. Conception unitaire.....	13
<i>Cowan (1988, 1999, 2005).....</i>	<i>13</i>
<i>Engle (1994).....</i>	<i>14</i>
I.3. LE MODELE DU PARTAGE TEMPOREL DES RESSOURCES.....	15
I.3.1. Les différents sous-composants	16
I.3.2. La boucle exécutive et la boucle articulatoire	17
I.3.3. Les quatre postulats du modèle de partage temporel des ressources.....	18
I.4. LES MECANISMES DE MAINTIEN DE L'INFORMATION VERBALE EN MEMOIRE DE TRAVAIL CHEZ L'ADULTE.....	20
I.4.1. Evidences neurophysiologiques	20
<i>Deux réseaux neuronaux distincts</i>	<i>20</i>
<i>Pertinence fonctionnelle de certaines aires cérébrales</i>	<i>22</i>
I.4.2. Evidences comportementales	23
<i>Indépendance et effet additif des deux mécanismes.....</i>	<i>23</i>
<i>Conséquences sur le rappel à court terme.....</i>	<i>25</i>
<i>Conséquences sur le rappel à long terme.....</i>	<i>30</i>
I.5. LE DEVELOPPEMENT DES MECANISMES DE MAINTIEN DE L'INFORMATION VERBALE.	35
I.5.1. Répétition articulatoire	35
<i>Changement qualitatif.....</i>	<i>35</i>
<i>Changement plus graduel</i>	<i>36</i>
I.5.2. Rafraîchissement attentionnel.....	39
<i>Utilisation du rafraîchissement attentionnel après 7 ans</i>	<i>41</i>
<i>Utilisation du rafraîchissement attentionnel autour de 6 ans.....</i>	<i>43</i>
I.5.1. Rafraîchissement attentionnel et répétition articulatoire	45
I.6. RESUME	47

I.7. L'ETUDE	47
I.7.1. Les stratégies de maintien lors de tâches d'empan complexe	48
I.7.2. Les stratégies mises en place lors de Tâches de Brown-Peterson.	49
I.7.3. Effet de la longueur des mots, de la similarité phonologique et des rimes.	52
CHAPITRE II : LES MECANISMES DE MAINTIEN DE L'INFORMATION VERBALE EN	
MEMOIRE DE TRAVAIL CHEZ L'ENFANT	55
II.1. EXPERIMENT 1	63
II.1.1. METHOD	64
<i>Participants</i>	64
<i>Materials</i>	64
<i>Procedure</i>	64
II.1.2. RESULTS	66
II.1.3. DISCUSSION	69
II.2. EXPERIMENT 2	70
II.2.1. METHOD	71
<i>Participants</i>	71
<i>Materials and Procedure</i>	71
II.2.2. RESULTS	72
II.2.3. DISCUSSION	75
II.3. GENERAL DISCUSSION	76
CHAPITRE III : EVOLUTION DES STRATÉGIES DE MAINTIEN DE L'INFORMATION	
VERBALES ENTRE 6 ET 8 ANS	81
III.1. EXPERIMENT 1	89
III.1.1. METHOD	90
<i>Participants</i>	90
<i>Materials and Procedure</i>	90
III.1.2. RESULTS	92
III.1.3. DISCUSSION	95
III.2. EXPERIMENT 2	96
III.2.1. METHOD	97
<i>Participants</i>	97
<i>Materials and Procedure</i>	97
III.2.2. RESULTS	99
III.2.3. DISCUSSION	103
III.3. JOINT ANALYSES	103
III.4. GENERAL DISCUSSION	105

CHAPITRE IV : EFFET DE LA LONGUEUR DES MOTS, DE LA SIMILARITÉ	
PHONOLOGIQUE ET DES RIMES.....	108
IV.1. EXPERIMENT 1.....	115
IV.1.1. METHOD	115
<i>Participants</i>	115
<i>Materials</i>	116
<i>Procedure</i>	117
IV.1.2. RESULTS.....	118
<i>Analyses of the concurrent tasks</i>	118
<i>Control of Phonological effects in simple span task</i>	119
<i>Recall analyses in complex span tasks</i>	120
IV.1.3. DISCUSSION.....	124
IV.2. EXPERIMENT 2.....	125
IV.2.1. METHOD	125
<i>Participants</i>	125
<i>Materials and Procedure</i>	125
IV.2.2. RESULTS.....	126
<i>Analyses of the concurrent task</i>	126
<i>Word length effect in the simple span task</i>	127
<i>Percentages of recall analyse in complex span tasks</i>	127
IV.2.3. DISCUSSION.....	129
IV.3. GENERAL DISCUSSION.....	130
CHAPITRE V : DISCUSSION GENERALE.....	134
V.1. EVOLUTION DEVELOPPEMENTALE DES MECANISMES DE MAINTIEN DE L'INFORMATION	
VERBALE EN MEMOIRE DE TRAVAIL	137
V.1.1. Interaction des mécanismes	137
V.1.2. Le développement de la répétition articulatoire et du rafraîchissement attentionnel	138
<i>La répétition articulatoire</i>	138
<i>Le rafraîchissement attentionnel</i>	141
V.1.3. Impact de l'introduction d'un délai et d'une tâche secondaire	142
V.2. CONCLUSION	143
BIBLIOGRAPHIE	146
Annex.....	158

Table des Figures

Figure I-1 : Représentation schématique d'une tâche d'empan simple et des deux tâches de mémoire de travail : Brown-Peterson et Empan complexe. " S "et" "T" désignent respectivement un objet de stockage et de traitement.....	5
Figure I-2 : Modèle de Baddeley (2012).....	8
Figure I-3 : Modèle de Cowan (1999)	13
Figure I-4 : Relations entre les composantes de la mémoire de travail (d'après Engle et al., 1999)	14
Figure I-5 : Modèle du partage temporel des ressources (Barrouillet & Camos, 2015).	16
Figure I-6 : Exemple de tâche d'empan complexe et événements ayant lieu lors des épisodes de traitement. Les barres grises représentent les processus de traitement (T) et de réactivation (R) et la ligne noire illustre le niveau d'activation des traces en mémoire. .	19
Figure I-7 : Réseaux soutenant le maintien non articulatoire (NAM, jaune) et le maintien articulatoire (AM, rouge) respectivement. Le chevauchement est indiqué en vert (Trapp et al., 2014).	22
Figure I-8 : Représentation de la tâche présentée dans l'expérience de Loaiza & Camos (in prep.) et exemple d'indice phonologique ou sémantique pouvant apparaître lors de la demande d'aide.	29
Figure I-9 : Une illustration des trois types d'essais de l'Expérience 3 de Loaiza & McCabe (2012) : (a) récupération espacée, (b) mots massés à la fin, et (c) mots massés au début. Les chiffres indiquent le nombre d'opportunités de rafraîchissement de l'essai pour chaque position.	31
Figure I-10 : Proportion de rappel avec délai en fonction de la position initiale pendant la tâche d'empan pour les conditions espacées, mots massés en premier, mots massés en dernier (Loaiza & McCabe, 2012, Expérience 3).	32
Figure I-11 : Représentation schématique des quatre tâches de mémoire présentées dans l'Expérience 1 de Tam et al. (2010) : Empan simple, Empan avec délai, Brown-Peterson, et Empan complexe. " S "et" "T" désigne respectivement un objet de stockage et de traitement, et chaque chiffre en indice indique le nombre d'élément de stockage ou de traitement. Chaque essai représenté ici est à une longueur de l'espace de quatre éléments de stockage.	37
Figure I-12 : Représentation schématique des différentes conditions de l'Expérience 1 de Gavens & Barrouillet (2004)	40

Figure I-13 : Empan moyen en fonction du coût cognitif de la tâche concurrente et de l'âge (Barrouillet et al., 2009, Expérience 1).....	42
Figure I-14 : Illustration des trois conditions : (a) pour 0 couleur, (b) pour 2 couleurs et (c) pour 4 couleurs.....	43
Figure I-15 : Illustration de trois essais: (a) pour la condition 1 couleur, (b) pour la condition courte avec 2 couleurs et (c) pour la condition longue avec 2 couleurs (Camos & Barrouillet, 2011b).....	44
Figure I-16 : Illustration des quatre tâches d'empan complexe utilisées dans l'expérience de Mora et Camos (2015)	46
Figure II-1 : Illustration of a length-2 trial in the complex span task used in Experiment 1...	65
Figure II-2 : Mean spans according to the concurrent tasks (color-discrimination vs. categorization), the type of responses (keyed vs. oral) and the age. Error bars represented standard errors.....	68
Figure II-3 : Percentage of correct recall according to the type of tasks (simple reaction time vs. color-discrimination), the type of responses (keyed vs. oral) and the age. Error bars represent standard errors.	74
Figure III-1 : Illustration of two type of task used in Experiment 1.	91
Figure III-2 : Mean spans according to the type of tasks (unfilled delay vs. filled delay), the type of responses (keyed vs. oral) and the age. Dotted lines represented simple span condition. Y bars represented standard errors.....	94
Figure III-3 : Illustration of different tasks used in Experiment 2.	98
Figure III-4 : Mean spans according to the type of tasks (empty delay, 1 smiley, 2 smileys), the type of responses (keyed vs. oral) and the age. Dotted lines represented simple span condition. Y bars represented standard errors.....	101
Figure IV-1 : Percentage of correct recall according to the type of tasks [SRT (Simple Reaction Time) vs. CRT (Choice Reaction Time = Color discrimination task)], the type of word (rhyme vs. similar vs. dissimilar), the type of responses (keyed vs. oral) and the age. Y bars represented standard errors.	122
Figure IV-2 : Percentage of correct recall according to the type of tasks [SRT (Simple Reaction Time) vs. CRT (Choice Reaction Time)], the type of word (short vs. long), the type of responses (keyed vs. oral) and the age.....	128

Introduction

La mémoire de travail est un système permettant à la fois le maintien et le traitement de l'information. Dans des situations quotidiennes, ces informations sont souvent de nature verbale. Par exemple, lors d'actes parmi les plus simples de notre vie quotidienne comme le fait de rendre de la monnaie, d'écouter puis de prendre en note les consignes données par un(e) enseignant(e), ou de noter le numéro de téléphone que nous souhaitons enregistrer sur notre téléphone portable, la mémoire de travail est indispensable. Une large littérature a démontré le lien entre la mémoire de travail et les performances lors d'activités cognitives complexes, comme les activités arithmétiques mentales, la résolution de problème et la compréhension de texte. Elle est aussi un très bon prédicteur des apprentissages scolaires (Lépine, Barrouillet, & Camos, 2005), notamment en lecture et en mathématiques (Alloway, Gathercole, Willis, & Adams, 2004; Gathercole, Brown, & Pickering, 2003; Leather & Henry, 1994; Swanson, Jerman, & Zheng, 2008) et dans l'acquisition du vocabulaire (Leclercq & Majerus, 2010). La mémoire de travail serait donc un des déterminants essentiels du développement cognitif (Barrouillet & Camos, 2007a).

Pour maintenir des informations verbales en mémoire de travail, les précédentes recherches, que nous détaillerons dans le premier chapitre, ont montré que nous utilisons deux mécanismes : la répétition articulatoire et le rafraîchissement attentionnel. La répétition articulatoire est un mécanisme spécifique au maintien de l'information verbale, qui nous permettrait de maintenir les informations sous forme de sons propres à notre langue (codes phonologiques) en les répétant pour éviter l'oubli. Le second mécanisme, le rafraîchissement attentionnel, est un mécanisme plus général, basé sur l'attention, nous permettant de maintenir tout type d'information sous forme de représentations multicode permettant de combiner plusieurs modalités sensorielles. Les informations peuvent, par exemple, être maintenues à l'aide de leurs caractéristiques visuelles (forme, couleur), sémantiques, sensorielles (texture), olfactives ou sonores.

Concernant le développement de ces mécanismes, de nombreuses études, datant principalement des années 80 (Gathercole & Baddeley, 1989), ont montré que l'utilisation de la répétition articulatoire apparaîtrait autour de 7 ans. Cependant, une récente étude a montré que le mécanisme de répétition articulatoire pourrait même être utilisé avant l'âge de 7 ans (Tam, Jarrold, Baddeley, & Sabatos-DeVito, 2010). Parallèlement, d'autres études ont montré que l'utilisation du rafraîchissement attentionnel apparaîtrait autour de 7 ans (Camos &

Barrouillet, 2011). De nombreux changements auraient donc lieu autour de cet âge charnière. L'étude conjointe de ces deux mécanismes chez l'enfant est très rare (Magimairaj & Montgomery, 2012; Mora & Camos, 2015; Tam et al., 2010). Ces études semblent indiquer que ces mécanismes sont indépendants chez l'enfant comme ils le sont chez l'adulte. Cependant, seule l'étude de Tam et al. (2010) a étudié l'évolution développementale de ces mécanismes en comparant deux groupes d'âge, des enfants de 6 et de 8 ans.

Les résultats de cette étude ont permis de montrer que l'utilisation de la répétition articulatoire se ferait dès l'âge de 6 ans et s'améliorerait avec l'âge. Les auteurs ont aussi proposé que l'utilisation du rafraîchissement attentionnel s'améliorerait entre 6 et 8 ans. Le but de cette thèse était donc d'étendre l'étude de l'évolution conjointe de ces deux mécanismes, et d'apporter plus d'éléments empiriques afin d'examiner l'hypothèse d'un changement qualitatif ou quantitatif du développement de la répétition articulatoire. Dans ce but, trois séries de deux expériences ont été menées.

Dans un premier temps, l'évolution conjointe des mécanismes de rafraîchissement attentionnel et de répétition articulatoire a été étudiée en utilisant des tâches d'empan complexe et en manipulant les deux mécanismes de manières orthogonales. Cette première étude (Chapitre II) avait pour but de tester l'utilisation de chacun des mécanismes indépendamment et d'explorer l'interaction potentielle entre ces deux mécanismes. Dans une deuxième étude (Chapitre III), l'évolution conjointe des deux mécanismes a été explorée via le paradigme de Brown-Peterson, qui nous a permis d'introduire facilement un délai ou une tâche secondaire après l'ensemble des items à mémoriser (Expérience 3). Nous avons de plus manipulé le coût attentionnel de la tâche secondaire (Expérience 4). Dans une troisième étude (Chapitre IV), nous avons utilisé des tâches d'empan complexe avec une manipulation orthogonale des deux mécanismes afin d'étudier l'impact des caractéristiques phonologiques des items à mémoriser sur le maintien en mémoire de travail. Nous nous sommes portées sur les effets de similarité phonologique, de rimes et de longueur des mots.

Chapitre I : PARTIE THEORIQUE

I.1. La Mémoire de Travail

La mémoire de travail nous permet de suivre une conversation, d'écouter et de prendre en note des informations, de réorganiser notre salon en fonction du nouveau canapé que l'on vient d'acheter. C'est un système dynamique ayant pour fonction le stockage temporaire d'informations et leur traitement. Nous allons dans un premier temps présenter la notion de mémoire de travail, comment elle a été introduite par Baddeley et Hitch (1974), et ses caractéristiques communes avec d'autres types de mémoires plus connues, notamment la mémoire à court terme.

I.1.1. Mémoire de Travail et Mémoire à Court terme.

Le terme de « mémoire de travail » est apparu pour la première fois dans le livre de Miller, Galanter, et Pribram (1960) pour décrire les fonctions du lobe frontal. Ces auteurs parlent de maintien temporaire de plans lorsqu'ils sont formés, transformés ou exécutés. Par la suite, le terme de mémoire de travail a été utilisé par Newell et Simon (1972) dans le domaine de la modélisation computationnelle, pour décrire la manipulation des connaissances dans l'objectif d'atteindre un but. Cependant, il faudra attendre l'émergence des travaux de Baddeley et Hitch en 1974 pour que cette notion prenne toute sa dimension actuelle. Les travaux princeps de Baddeley et Hitch ont donné naissance au modèle à composantes multiples (Baddeley, 1986). Ce modèle, plusieurs fois mis à jour (Baddeley, 2000, 2003, 2012), reste encore aujourd'hui le plus influent. Enraciné dans les théories relatives à la mémoire à court terme, ce modèle est né des critiques du modèle d'Atkinson et Shiffrin (1968), dominant à l'époque, qui proposait trois registres mnésiques : les registres sensoriels, la mémoire à court terme et la mémoire à long terme. Les registres sensoriels permettraient de maintenir les stimuli externes de l'environnement, via la vision, l'audition, le toucher, l'odorat ou le goût. La mémoire à court terme permettrait le maintien des informations sous forme de sons pendant une courte période de temps (moins de 30 sec.). La mémoire à long terme permettrait le maintien d'information de façon permanente. Pour Atkinson et Shiffrin (1968), l'information passe successivement par ces trois registres de façon séquentielle. Par conséquent, si une des composantes ne fonctionne plus ou est endommagée, des problèmes

devraient se répercuter au niveau suivant. Cependant, plusieurs études, dont celle de Shallice et Warrington (1970), ont permis de mettre en avant une double dissociation entre la mémoire à long terme et la mémoire à court terme. Lorsque l'utilisation de la mémoire à long terme est lésée, celle de la mémoire à court terme reste intacte et inversement, lorsque l'utilisation de la mémoire à court terme est lésée, l'utilisation de la mémoire à long terme reste intacte. Cette double dissociation permet d'isoler ces deux systèmes. Cet élément remettant totalement en cause le modèle d'Atkinson et Shiffrin (1968) a cependant permis de confirmer la distinction entre la mémoire à court terme et la mémoire à long terme et a, par la suite, conduit à la démarcation de la mémoire de travail.

Comme nous venons de voir dans le paragraphe précédent, la mémoire de travail a été définie à partir de la mémoire à court terme et est, pour cette raison, très proche de la mémoire à court terme. Cependant, la mémoire de travail se distingue de la mémoire à court terme par ses propriétés dynamiques. En effet, la mémoire de travail permet, en plus du simple maintien à court terme, de traiter l'information. C'est donc ce traitement, plus ou moins complexe des informations, qui est lié à la mémoire de travail et qui la distingue de la mémoire à court terme.

I.1.2. Empan mnésique

La mémoire de travail, comme la mémoire à court terme, est une mémoire dite temporaire, car limitée à une courte période de temps, une vingtaine de secondes en moyenne (Peterson & Peterson, 1959). Le nombre d'éléments que l'on peut garder en mémoire pendant un court laps de temps, nommé l'empan mnésique, a été décrit par Georges Miller (1956), qui a déterminé l'empan mnésique à 7 éléments +/- 2. Plusieurs études ont suggéré que Miller aurait surestimé cet empan et proposent un empan de quatre éléments (Cowan, 2001; Luck & Vogel, 1997; Sperling, 1960). Cette capacité limitée à quatre éléments ne se réfère pas nécessairement à 4 éléments isolés, mais peut être également des regroupements d'items ayant une signification, appelés « chunks » (Chen & Cowan, 2009; Miller, 1956). D'autres conceptions estiment que nous serions limités à un seul élément (par exemple, McElree, 2001; Oberauer, 2002)

Différentes stratégies peuvent être utilisées pour accroître l'empan mnésique, notamment l'utilisation des « chunks ». Par exemple, si vous essayez de maintenir la suite de lettre "CTPAESIFINPIAROANNAAO", vous allez probablement retenir très peu de lettres.

Par contre, si je vous demande de retenir cette nouvelle suite, comportant le même nombre de lettres que la précédente. "COCAFANTAPEPSIORANGINA", vous êtes susceptibles de plus facilement la retenir. En effet, si vous avez noté que les lettres sont classées pour former le nom de boissons sucrées, vous retiendrez probablement plus de lettres que lors de l'exemple précédent. Il faut cependant que les boissons sucrées soient connues et stockées en mémoire à long terme. C'est donc le regroupement de ces lettres en chunks, stockés en mémoire à long terme, qui permet une meilleure mémorisation. Lors de l'utilisation de chunks, on se souvient ainsi de plus d'éléments. Cette stratégie est cependant limitée, car plusieurs facteurs sont en jeu et plus les chunks sont longs, plus la probabilité de les oublier est grande (Cowan, Rouders, Blume, & Sauls, 2012).

I.1.3. Tâches spécifiques de la mémoire de travail

Deux types de tâches sont généralement utilisés afin d'évaluer la mémoire de travail : les tâches de Brown-Peterson et les tâches d'empan complexe. Contrairement aux tâches d'empan simple, évaluant la mémoire à court terme, ces tâches prennent en compte le caractère dynamique de la mémoire de travail (Redick et al., 2012). En effet, en plus des différentes tâches demandant le maintien d'informations, des tâches concurrentes ont été ajoutées, qui requièrent un traitement de l'information, en plus de son stockage (Figure I-1).

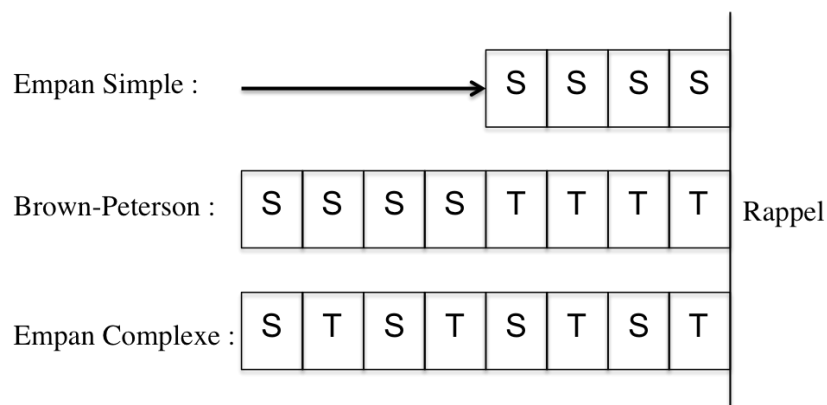


Figure I-1 : Représentation schématique d'une tâche d'empan simple et des deux tâches de mémoire de travail : Brown-Peterson et Empan complexe. " S "et" "T" désignent respectivement un objet de stockage et de traitement.

La première tâche ayant spécifiquement pour but d'évaluer la capacité fonctionnelle de la mémoire de travail est la tâche d'empan de lecture (« reading span task ») de Daneman et Carpenter (1980). Cette tâche, toujours très utilisée, consiste à lire des séries de phrases (de longueur croissante) présentées séquentiellement, à comprendre le sens et juger la pertinence de la phrase et à mémoriser le dernier mot de chacune des phrases lues. A la fin de chaque groupe de phrases, les participants doivent restituer les mots retenus. L'empan correspond au nombre total de mots correctement rappelés et pour lesquels la compréhension de la phrase était correcte. Lors de cette tâche, appartenant à ce qui est nommé plus généralement les tâches d'empan complexe, les items à traiter (la lecture et compréhension des phrases) alternent avec les items à mémoriser (le dernier mot de chaque phrase).

D'autres tâches d'empan complexe ont par la suite été créées, comme les tâches d'empan de comptage (counting span task), consistant à compter des groupes de points présentés successivement et à rappeler le nombre de points de chaque collection (Case, 1985; Case, Kurland, & Goldberg, 1982). Les tâches d'empan d'opérations (operation span task) ont aussi vu le jour, où des mots sont à mémoriser tout en vérifiant des opérations arithmétiques intercalées entre chaque mot (Turner & Engle, 1989). Ces tâches d'empan complexe nécessitent donc le maintien en mémoire de listes de mots, de chiffres ou de lettres tout en effectuant une tâche secondaire.

D'autres types de tâches, les tâches de Brown-Peterson, créées au départ pour évaluer le déclin des traces mnésiques en mémoire à court terme, permettent d'évaluer la mémoire de travail (Brown, 1958; Peterson & Peterson, 1959). Contrairement aux tâches d'empan complexe, les items à mémoriser lors des tâches de Brown-Peterson sont groupés au début d'un essai, suivi par la tâche concurrente de traitement (Figure I-1). Par exemple, dans l'étude de Peterson et Peterson (1959), les participants devaient retenir des groupes de trois lettres et les rappeler suite à un délai de 9, 18 ou 36 secondes. Durant ce délai, les participants devaient en partant d'un nombre à trois chiffres décompter le plus rapidement possible à rebours de trois en trois (ex : Le nombre « 156 » apparaissait à l'écran et les participants devaient décompter « 153, 150, 147, 144... »).

Les tâches d'empan complexe et celles de Brown-Peterson sont les plus utilisées pour évaluer la capacité de la mémoire de travail et étudier son fonctionnement. L'ensemble des modèles de mémoire de travail se base principalement sur l'utilisation de ces tâches.

I.2. Les différents modèles de mémoire de travail

Deux grandes conceptions émergent des différents modèles de mémoire de travail. D'une part, la conception multidimensionnelle qui considère la mémoire de travail comme un système composé de différents modules spécifiques aux différents types d'items à mémoriser. D'autre part, la conception unitaire qui met en avant le fait que la mémoire de travail aurait un pool commun de ressources limitées. Le modèle sur lequel repose ce travail de thèse, le modèle de partage temporel des ressources (Time-Based Resource-Sharing, TBRS), se situe à mi-chemin entre ces deux grandes conceptions (Lepine, Barrouillet, & Camos, 2005).

Dans cette partie, avant d'aborder une description du modèle de partage temporel des ressources, nous aborderons ces deux grandes conceptions. Dans un premier temps, nous commencerons par présenter le modèle à composantes multiples de Baddeley. Nous détaillerons en particulier une des composantes, présente également dans le modèle TBRS, la boucle phonologique et les effets qui établissent son existence. Dans un second temps, après avoir eu un point de vue d'ensemble des différents modèles ayant une vision plus unitaire, nous spécifierons la place du modèle de partage temporel des ressources par rapport à ces conceptions multidimensionnelle et unitaire.

I.2.1. Conception multidimensionnelle

La conception modulaire suppose que chaque fonction particulière va être attribuée à une composante spécifique du modèle. Les différents éléments composant le système fonctionnent ensemble mais sont distincts.

Modèle à composantes multiples de Baddeley

Dans la conception multidimensionnelle, la mémoire de travail est composée de différents modules spécifiques aux différents types d'items à mémoriser. Un modèle typique de cette conception est le modèle de Baddeley (1986), dans lequel la mémoire de travail est un système dynamique, pourvu de plusieurs composantes : une composante attentionnelle, l'administrateur central et deux sous-systèmes, dits esclaves qui sont la boucle phonologique et le calepin visuo-spatial (Figure I-2). L'administrateur central coordonne et supervise les deux sous-systèmes qui permettent le stockage. En 2000, Baddeley a ajouté une nouvelle composante, le buffer épisodique, permettant le maintien temporaire de différentes sources

d'informations. Ce buffer serait contrôlé par l'administrateur central, et permettrait de faire l'interface entre les systèmes esclaves. Son but est d'intégrer des informations issues des systèmes esclaves dans des représentations unitaires appelées des épisodes. Dans le modèle présenté ci-dessous (Figure I-2), Baddeley (2012) enrichit encore plus son modèle originel en précisant les différentes sources d'informations perceptives rattachées aux différentes composantes.

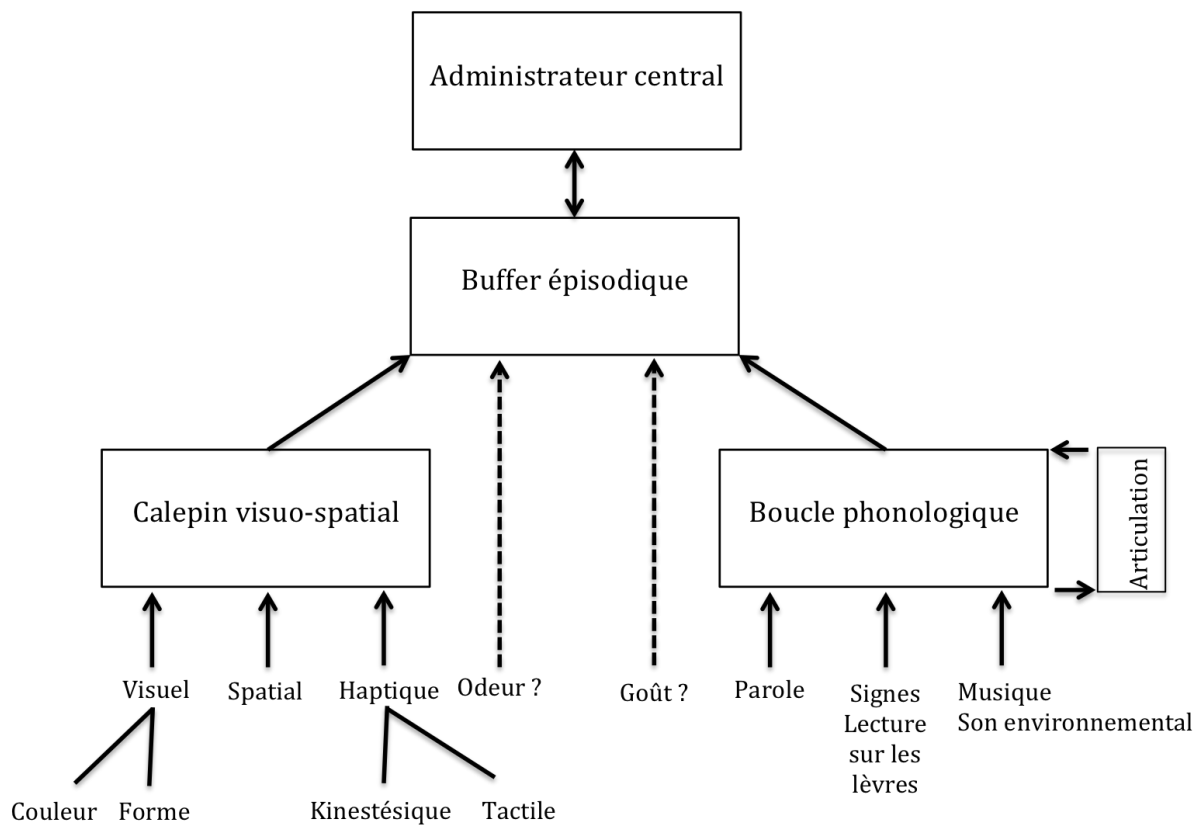


Figure I-2 : Modèle de Baddeley (2012).

Les différentes composantes

L'administrateur central a pour but de contrôler, sélectionner et coordonner les informations qui viennent des sous-composantes. Le contrôle, la sélection et la coordination des informations permettraient de résoudre des problèmes, de prendre des décisions et de comprendre des énoncés. L'administrateur central permettrait aussi d'ignorer les informations non pertinentes et distrayantes. Parmi les deux systèmes esclaves, le calepin visuo-spatial permet le maintien des informations visuelles et spatiales, alors que la boucle phonologique

est dédiée au maintien des informations verbales. Nous allons aborder plus en détail ce système esclave compte tenu du fait que ce travail porte sur le maintien des informations verbales.

Le rôle de la boucle phonologique est de stocker temporairement toute information verbale, orale ou écrite. La boucle phonologique est constituée de deux composantes (Baddeley, 1986) : une composante passive permettant le stockage des informations, le stock phonologique, et une composante active, dont le rôle est de maintenir la trace en mémoire par répétition articulatoire. Différents éléments décrits ci-dessous établissent l'existence de la boucle phonologique, que ce soit à travers l'existence d'un stockage phonologique ou de l'utilisation de la répétition articulatoire. Le stockage sous forme phonologique est mis en évidence par l'effet de similarité phonologique et l'effet d'écoute inattentive alors que l'effet de longueur de mots et l'effet de suppression articulatoire attestent de l'utilisation de la répétition articulatoire.

Similarité phonologique et rimes

L'effet de similarité phonologique correspond à une diminution du nombre d'items correctement rappelés lorsque les items sont phonologiquement similaires par rapport au nombre d'items correctement rappelés lorsqu'ils sont phonologiquement dissimilaires. Cet effet de similarité phonologique apparaît lors de l'utilisation du stockage phonologique et est dû à une confusion entre différents items proches phonologiquement que l'on va essayer de maintenir dans le stock phonologique. Par exemple, il est plus difficile de retenir une liste de mots comme « *cap, natte, rame, sac* » qui ont en commun le phonème central [a] qu'une liste composée de mots dissimilaires phonologiquement comme « *robe, poule, tasse, main* ». Cet effet est présent lors d'une présentation auditive des items à maintenir, mais il peut aussi apparaître lors de la mémorisation d'items présentés visuellement. Par exemple, Conrad et Hull (1964), ont pu montrer que les participants étaient affectés négativement par la similarité phonologique du nom d'items présentés visuellement. Les participants ont donc recodé les items sous forme phonologique. De manière similaire, la séquence de lettres suivante « g, c, b, t, v, p » dont les sons sont similaires en anglais est moins bien rappelée que la séquence de lettres « f, w, k, s, y, q » dont les sons sont dissimilaires (Baddeley, 1966). L'effet de similarité phonologique démontre que le stockage de l'information se fait sous forme phonologique et de nombreuses études ont répliqué cet effet lors de tâche d'empan simple

(pour une revue, voir Lewandowsky & Farrell, 2008). Cependant, peu d'études ont exploré cet effet lors de paradigmes d'empan complexe (Camos, Mora, & Barrouillet, 2013; Camos, Mora, & Oberauer, 2011; Lobley, Baddeley, & Gathercole, 2005; Macnamara, Moore, & Conway, 2011; Tehan, Hendry, & Kocinski, 2001). Dans certaines de ces études, l'effet de similarité phonologique a été relevé, par exemple, lors de différentes versions de tâches d'empan d'écoute (Lobley et al., 2005). Lors de ces tâches, les participants devaient écouter une phrase et mémoriser le dernier mot en jugeant sa grammaticalité (Expérience 1), en jugeant l'exactitude de la phrase (Expérience 3), ou en complétant la phrase (Expérience 2). Les empan d'écoute étaient significativement supérieurs lors du maintien de mots phonologiquement dissimilaires que lors du maintien de mots phonologiquement similaires, confirmant l'effet de similarité phonologique. Cet effet n'a cependant pas été reproduit dans toutes les études utilisant des paradigmes d'empan complexe. Par exemple, dans l'étude de Macnamara, Moore, et Conway (2011, Expérience 3), les participants devaient effectuer une tâche d'empan de lecture, dont les mots à mémoriser étaient similaires ou dissimilaires phonologiquement. Les participants devaient lire à haute voix les phrases qui apparaissaient à l'écran et mémoriser le dernier mot de chaque phrase. La différence entre le nombre de mots similaires phonologiquement et le nombre de mots dissimilaires phonologiquement correctement rappelés n'était pas significative, empêchant les auteurs de mettre en évidence un effet facilitateur ou délétère de la similarité phonologique sur l'empan de lecture.

L'effet de similarité phonologique a aussi d'autres limites: lorsque la similarité est telle que les deux derniers phonèmes sont identiques, donc que les mots riment, cet effet n'est pas toujours présent. Lors de l'utilisation de paradigmes d'empan simple, l'effet de rimes tout comme l'effet de similarité phonologique n'était pas toujours présent (pour une méta-analyse voir Gupta, Lipinski, & Aktunc, 2005). De plus, en utilisant des tâches de Brown-Peterson, Tehan et Humphreys (1995) n'observaient pas de différence de rappel entre les listes de mots dissimilaires et des mots qui rimaient. Cependant, lors de tâche d'empan simple, les mots rimant étaient moins bien rappelés que les mots dissimilaires. Cette atténuation, voire la disparition de l'effet de similarité phonologique lors du rappel des listes de mots qui riment, après une courte période de temps, a été mis en évidence dans les études de Fallon, Groves, et Tehan (1999) et Tehan et al. (2001). A l'inverse, les études de Copeland et Radvansky (2001) et Fournet, Juphard, Monnier, et Roulin (2003) ont relevé un effet facilitateur du maintien de rimes. Dans l'étude de Fournet et al. (2003), les participants devaient, lors d'une tâche de Brown-Peterson, maintenir des mots (rimes ou dissimilaires) puis lire des chiffres pendant un

délai variable de 2, 8 ou 24 secondes. Après un délai de 24 secondes, les auteurs ont observé un effet facilitateur des rimes, avec un meilleur maintien des listes de mots qui riment que les listes comportant des mots qui n'ont pas de phonèmes en commun. Après 8 secondes, le rappel était similaire quel que soit le type de matériel à maintenir et après 2 secondes, le rappel était moins bon pour les listes comportant des rimes que pour celles qui ne comportaient que des mots dissimilaires. L'effet de similarité phonologique serait donc présent pour les rimes uniquement lors de tâches d'empan simple. Lors de tâches d'empan complexe, l'effet délétère pour les mots qui riment disparaîtrait au profit d'un effet facilitateur, permettant un meilleur rappel. La proximité phonologique des items peut donc parfois aider à les maintenir ou venir entraver ce maintien. Dans tous les cas, ces effets prouvent que les items sont stockés ensemble sous forme de sons, comme des phonèmes, donc qu'on utilise un stockage phonologique.

Ecoute inattentive

Un autre effet mettant en évidence l'utilisation d'un stockage phonologique est l'effet de l'écoute inattentive ou du discours non pertinent. Cet effet se traduit par l'altération du rappel en présence de stimuli auditifs inutiles que le sujet doit inhiber. Cet effet a été utilisé dans plusieurs recherches, notamment celle de Colle et Welsh (1976) qui a été la première étude à montrer ce phénomène, appelé à l'époque « masquage acoustique en mémoire primaire » (p.17). Dans cette étude, les participants devaient maintenir des consonnes présentées visuellement alors qu'ils entendaient en même temps des stimulations auditives concurrentes (un extrait de texte lu en allemand). Même lorsque les participants étaient informés de ne pas porter attention aux stimuli non pertinents, leur présence diminuait le rappel des consonnes présentées visuellement. Cet effet a été plusieurs fois reproduit, même lorsque les stimuli à mémoriser étaient présentés auditivement et pas visuellement (voir Neath, 2000, pour une revue). Plusieurs auteurs ont relevé l'importance des caractéristiques acoustiques des stimuli non pertinents : les stimuli devaient comporter des phonèmes clairement identifiables pour perturber le rappel. Les musiques ne comportant pas de textes n'entraînaient pas de diminution du rappel (voir Jones, 1993, pour une revue).

Longueur de mots

Un autre effet mettant en évidence l'utilisation de la boucle phonologique, est l'effet de longueur des mots. Il souligne plus exactement l'utilisation de la répétition articulatoire et correspond au fait que le rappel de mots monosyllabiques est meilleur que le rappel de mots polysyllabiques. En effet, les mots comportant plusieurs syllabes prennent plus de temps à être répétés que les mots ne comportant qu'une seule syllabe. On peut ainsi répéter plus de mots courts que de mots longs dans un même laps de temps. Baddeley, Thomson, et Buchanan (1975) ont montré que plus les mots sont longs (de 1 à 5 syllabes) plus l'empan est faible. Pour Baddeley, Chincotta, Stafford, et Turk (2002), l'effet de la longueur des mots serait à la fois le résultat de l'utilisation de la répétition pendant le maintien de l'information et de l'oubli pendant le rappel. Les mots longs ont besoin de plus de temps pour être répétés pendant le maintien, mais ils prennent aussi plus de temps pour être rappelés et donc vont être plus enclin à l'oubli pendant le rappel que les mots courts.

Suppression articulatoire

L'effet de suppression articulatoire apparaît lorsque l'on occupe le processus de répétition articulatoire par la répétition d'autres items que ceux qui doivent être maintenus en mémoire. Cet effet se traduit par une diminution du rappel lorsque l'on supprime, ou plus exactement lorsque l'on gêne, l'utilisation de la répétition articulatoire. En effet, lorsque l'on entrave l'utilisation de la répétition articulatoire, par la répétition de chiffres, de mots voire d'une seule syllabe en continu de manière itérative (par exemple, « bababa »), les effets dépendants du processus de répétition articulatoire, comme les effets de similarité phonologique et de longueur des mots, disparaissent. Par exemple, dans l'étude de Murray (1968), les participants devaient mémoriser des séquences de consonnes similaires ou dissimilaires en répétant de façon continue le mot « the ». Cette répétition du mot « the » a entraîné une diminution du nombre de consonnes correctement rappelées ainsi que la suppression de l'effet de similarité phonologique, les séquences de consonnes similaires étant aussi bien rappelées que les séquences de consonnes dissimilaires.

L'ensemble de ces effets légitime l'existence de la boucle phonologique, la composante du modèle de Baddeley permettant le maintien des informations verbales. Suite au modèle de Baddeley, d'autres conceptions ont émergé rejetant l'idée d'une représentation modulaire de la mémoire de travail et soutenant l'idée d'une structure unitaire.

I.2.2. Conception unitaire

Contrairement aux modèles abordés dans la précédente partie, certains modèles rejettent l'idée que la mémoire de travail est une structure comportant différentes composantes. Ces modèles soutiennent une conception unitaire de la mémoire de travail et imaginent qu'elle serait plutôt la partie activée de la mémoire à long terme (Cowan, 2001; Engle, Tuholski, Laughlin, & Conway, 1999; Ericsson & Kintsch, 1995; Oberauer & Kliegl, 2006). Le modèle de Cowan (2005) et le modèle d'Engle (Engle & Kane, 2004) ont relié le fonctionnement de la mémoire de travail à l'attention, tout comme le modèle du TBRS que nous aborderons par la suite. Dans leurs conceptions, la mémoire de travail dépendrait de la quantité de ressources attentionnelles disponibles.

Cowan (1988, 1999, 2005)

Pour Cowan, qui propose une définition plus fonctionnelle que structurelle de la mémoire de travail, nous disposerions d'un ensemble de processus emboîtés les uns dans les autres (embedded processes) et la mémoire de travail serait une sous partie de la mémoire à long terme (Figure I-3).

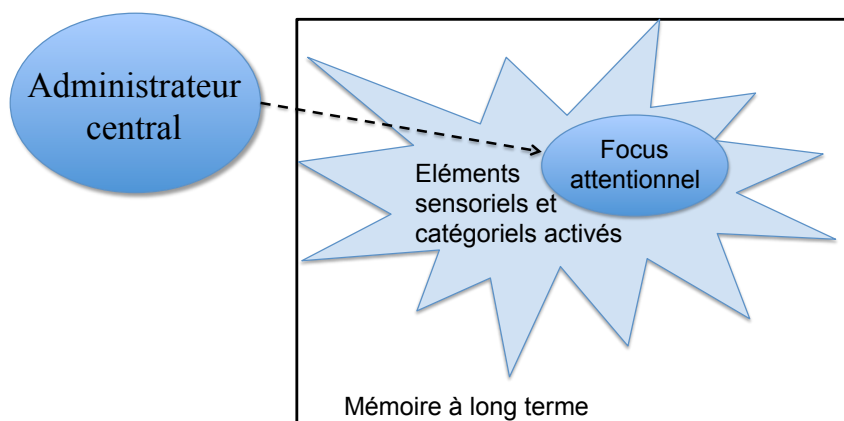


Figure I-3 : Modèle de Cowan (1999)

D'après Cowan, les items en mémoire auraient différents niveaux d'activation et ce serait le degré d'activation plus élevé d'un item, qui déterminerait sa présence en mémoire de travail. Cette activation, contrôlée par des processus attentionnels, serait temporaire et déclinerait avec le temps. Parmi les items activés, une partie aurait un niveau d'activation

supérieure dû au fait que l'on centre notre attention sur cette partie des items. Ces items sont les plus accessibles à la conscience et se situent dans ce que Cowan nomme le focus attentionnel. Selon lui, ce focus attentionnel pourrait contenir au maximum quatre éléments (Cowan, 2001). Ces éléments, peuvent être des items simples (par exemple, un chiffre) comme des regroupements d'items ayant une signification, appelés chunks (par exemple, les chiffres constituant un code postal, 1700). L'activation de ces éléments va donc décliner sauf si on porte une attention sur ces items ou si on utilise de la répétition subvocale.

Engle (1994)

Le modèle d'Engle (Conway & Engle, 1994; Engle & Kane, 2004; Engle et al., 1999) est similaire à celui de Cowan. Ainsi, pour Engle, la mémoire de travail serait composée d'un système central exécutif (appelé aussi contrôle attentionnel ou système superviseur attentionnel) et d'une partie activée de la mémoire à long terme, qui serait la mémoire à court terme (Figure I-4).

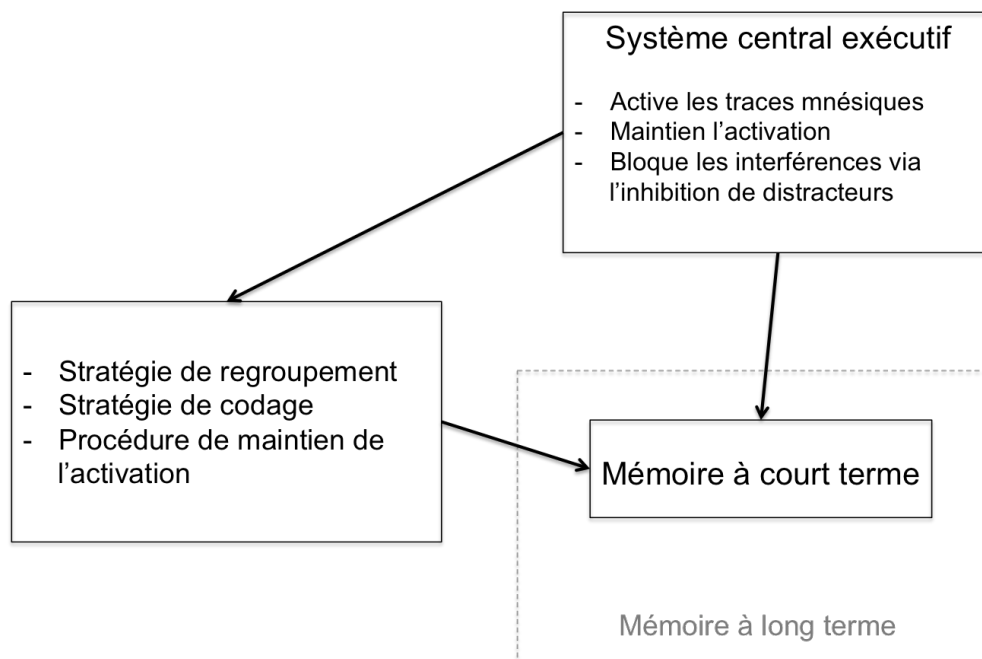


Figure I-4 : Relations entre les composantes de la mémoire de travail (d'après Engle et al., 1999)

Engle suppose que la mémoire à court terme est une zone de stockage temporaire qui serait une sous composante de la mémoire de travail. La taille de cette zone peut varier en fonction des stratégies qui peuvent être mises en place. Le système central exécutif

permettrait d'activer les traces mnésiques en mémoire à court terme, de garder un niveau d'activation de ces traces pendant toute la durée de la tâche à effectuer et d'inhiber les stimuli qui pourraient interférer avec les traces mnésiques. Différentes stratégies de regroupement, de codage et de maintien de l'activation peuvent aider le système central exécutif. Les procédures de maintien et les stratégies de codages peuvent être sous forme phonologique, visuelle, spatiale, motrice, auditive, etc. Selon Engle et al. (2009), les différences individuelles, relatives à la quantité d'éléments stockables, s'expliqueraient par des différences en terme de capacité au niveau du contrôle attentionnel, donc au niveau du système central exécutif. Ce point diffère de la vision de Cowan présentée précédemment, dans laquelle l'accent est mis sur les limites en terme de capacité de stockage, donc au niveau de la capacité en mémoire à court terme (Courage & Cowan, 2009; Cowan & Alloway, 1997).

Le système central exécutif est l'élément central du modèle d'Engle. Parmi les différentes fonctions du système central exécutif, l'inhibition des informations non pertinentes est une des fonctions les plus importantes pour Engle (Conway & Engle, 1994). Le point de vue de Cowan et celui d'Engle diffèrent aussi concernant le fonctionnement de l'inhibition. Pour Engle, l'inhibition serait un processus spécifique qui puiserait dans les mêmes ressources que les processus attentionnels (Engle, Conway, Tuholski, & Shisler, 1995). A l'inverse, pour Cowan, l'inhibition ne serait pas un processus de répression mais serait le résultat d'une différence d'activation. Les items inhibés seraient les items dont le niveau d'activation serait inférieur au niveau d'activation de base des autres items.

I.3. Le modèle du partage temporel des ressources

Le modèle du partage temporel des ressources (TBRS, Barrouillet, Bernardin, & Camos, 2004) se situe à l'interface entre les théories unitaires et les conceptions modulaires. Dans ce modèle, comme dans les conceptions unitaires, une seule ressource est disponible. En effet, l'attention se partage entre le traitement et le stockage de l'information. D'autre part, comme dans les conceptions modulaires, le modèle du TBRS, en s'inspirant du modèle de Baddeley et du modèle ACT-R d'Anderson, suppose aussi la présence de différents sous-composants dans la conception de la mémoire de travail. Le modèle ACT-R d'Anderson et al. (2004) propose, comme le modèle de Baddeley, l'idée de systèmes esclaves reliés à un buffer permettant le maintien de but. Le modèle ACT-R est composé de différents modules : un module intentionnel, un module de récupération relié à un module déclaratif et un buffer

moteur. Dans le modèle du TBRS, également composé de différents modules, des ressources disponibles se partagent entre le traitement et le stockage au cours du temps. Le traitement et le stockage de l'information ne s'effectuent donc pas en parallèle, contrairement aux conceptions unitaires, mais l'un après l'autre. Ce modèle est constitué d'un système central, chargé à la fois du maintien et de la transformation des représentations en mémoire de travail, et de sous-composants périphériques. Ces sous-composants permettent un stockage passif des informations, sauf la boucle phonologique qui peut permettre de maintenir des informations verbales de façon active.

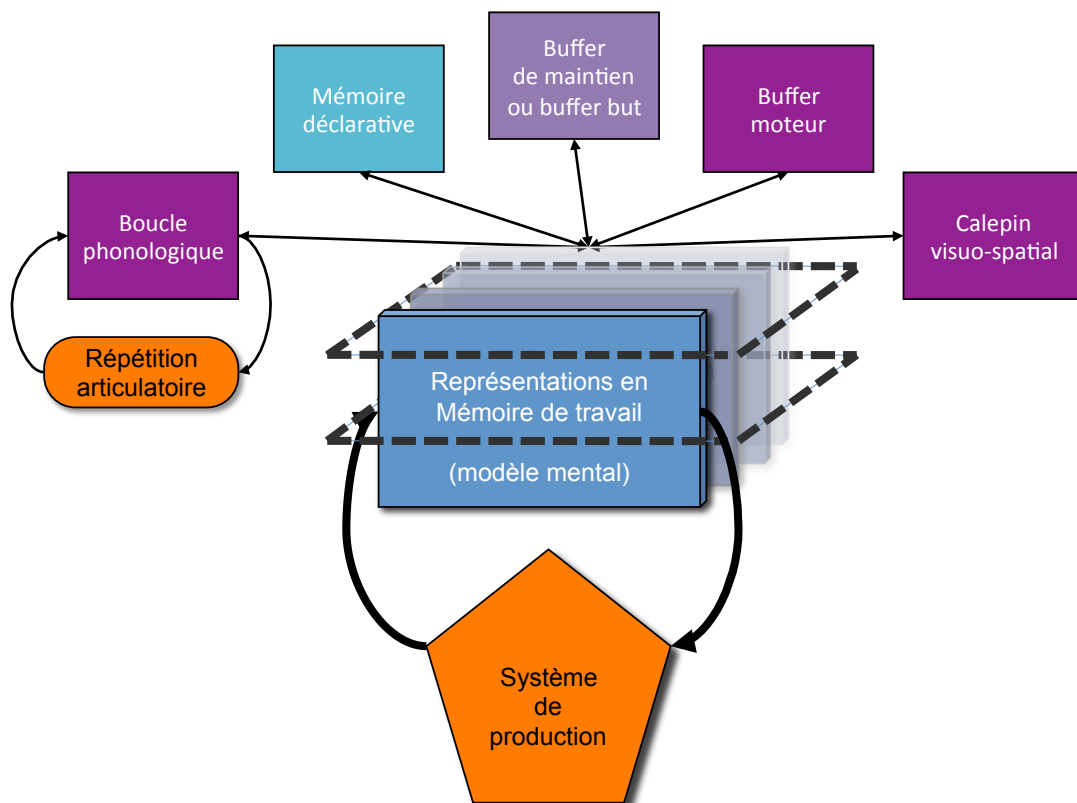


Figure I-5 : Modèle du partage temporel des ressources (Barrouillet & Camos, 2015).

I.3.1. Les différents sous-composants

Le modèle du TBRS soutient l'idée de différents sous-systèmes spécialisés pour le maintien spécifique de certaines informations. Cinq sous-composants sont représentés dans la version étendue du modèle du TBRS (Figure I-5). Cependant, les auteurs supposent que d'autres sous-systèmes existent dans le but de maintenir d'autres types d'information comme les informations musicales, tactiles ou olfactives (Barrouillet & Camos, 2015).

La boucle phonologique et le *calepin visuo-spatial* sont, comme dans le modèle de Baddeley, deux sous-composants de la mémoire de travail. Cependant, contrairement au modèle de Baddeley le modèle du TBRS suppose que seule la boucle phonologique a son propre système de maintien de l'information, la répétition articulatoire. Le calepin visuo-spatial serait entièrement dépendant du système central et n'aurait pas de système spécifique au maintien des informations visuelles et spatiales.

La boucle exécutive permettrait le maintien de tout type d'information, quelle que soit sa nature. Elle serait le lieu de la construction et de la transformation des représentations en mémoire de travail.

Le module de *mémoire à long terme déclarative* permettrait de fournir des informations au système central. Contrairement aux conceptions de Cowan et d'Engle et à la première version du TBRS, dans la version étendue du TBRS, la mémoire de travail n'est pas considérée comme une partie activée de la mémoire à long terme. La mémoire à long terme serait toutefois à la base des représentations construites en mémoire de travail.

Le *buffer de maintien* permettrait de produire des représentations des buts construites à partir des instructions de la tâche à effectuer ou basées sur les expériences passées stockées en mémoire à long terme ou sur les constructions hypothétiques du futur.

Le *buffer moteur* serait un des sous-composants qui servirait spécifiquement pour les inputs moteurs.

Le maintien actif des informations se ferait grâce à deux sous-systèmes : la boucle exécutive et la boucle articulatoire.

I.3.2. La boucle exécutive et la boucle articulatoire

La boucle articulatoire ou phonologique permet un maintien actif des informations et ne concerne que les informations verbales. Lorsque le maintien des informations verbales ne peut plus être assuré par cette boucle phonologique, car elle est surchargée ou qu'elle est entravée par une articulation concurrente, c'est le système central qui prendrait le relais. Ce système central, nommé aussi boucle exécutive serait relié à l'ensemble des sous-composants. Tout type d'information, quelle que soit sa nature, peut être maintenu en mémoire de travail via cette boucle exécutive. Cette boucle permet, en plus du maintien des informations, la construction et la transformation des représentations en mémoire de travail. Ces

représentations ne sont pas une partie activée de la mémoire à long terme, mais sont des représentations construites à partir des informations provenant des systèmes périphériques.

I.3.3. Les quatre postulats du modèle de partage temporel des ressources

Le modèle TBRS comporte différents modules et se base sur un partage des ressources attentionnelles entre le traitement de l'information et son stockage. Il est basé sur quatre postulats (Barrouillet & Camos, 2010).

Premièrement, une seule et même ressource limitée serait disponible pour le maintien et le traitement de l'information. Le traitement et le stockage de l'information nécessiteraient donc tous les deux de l'attention. Cette ressource étant limitée, elle doit donc être constamment partagée entre les deux processus.

Deuxièmement, un seul élément à la fois peut être dans le focus attentionnel dans une période donnée. Par conséquent, comme les processus de traitement et de maintien de l'information ne peuvent pas avoir lieu en même temps, le partage de l'attention, décrit dans le premier postulat, va se faire au cours du temps. Lorsque l'attention se porte sur les processus de traitement, elle ne peut pas être utilisée pour le maintien d'informations et inversement. Le partage de l'attention va donc se faire en alternant dans le temps les périodes consacrées aux traitements et celles dédiées au maintien de l'information.

Troisièmement, tout traitement qui capture l'attention va interférer avec le maintien de l'information. Dès que l'attention n'est plus portée sur les traces mnésiques, leur activation va diminuer avec le temps (Barrouillet & Camos, 2009; Portrat, Barrouillet, & Camos, 2008). Pour éviter de perdre complètement les traces mnésiques suite à ce déclin temporel, elles doivent être réactivées, via le processus de répétition articulatoire, décrit dans le modèle de Baddeley, ou par le processus de récupération via une refocalisation attentionnelle décrit par Cowan (1992). Cette réactivation pourrait se faire lors de courtes pauses lors du traitement. La Figure I-6 représente une tâche d'empan complexe comportant des mots à mémoriser et une tâche de jugement de parité à effectuer après chaque mot. Dans notre exemple la tâche de jugement de parité (T) ne se fait pas de façon continue, de courtes pauses sont possibles, par exemple entre chaque chiffre à juger. Ces pauses peuvent permettre la réactivation (R) des traces en mémoire. Si ces pauses sont assez longues, les items à mémoriser vont pouvoir être réactivés et retrouver leur niveau d'activation initial comme l'illustre la Figure I-6.

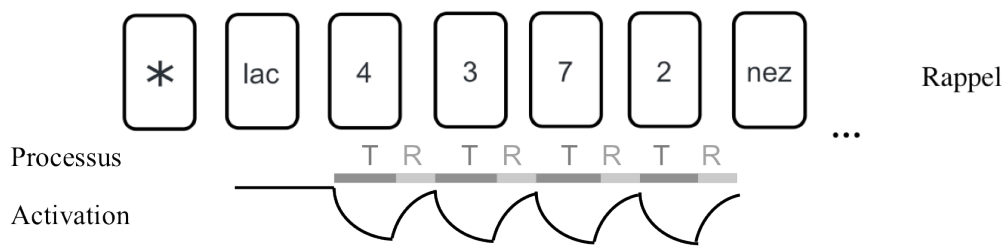


Figure I-6 : Exemple de tâche d'empan complexe et événements ayant lieu lors des épisodes de traitement. Les barres grises représentent les processus de traitement (T) et de réactivation (R) et la ligne noire illustre le niveau d'activation des traces en mémoire.

Quatrièmement, le partage de l'attention se fait grâce à un rapide et incessant processus d'alternance, entre les processus de traitement et ceux de maintien de l'information. Cette alternance est importante car comme nous l'avons vu précédemment, l'attention est limitée et les traces mnésiques déclinent dès qu'elles sont hors du focus attentionnel.

Dans ce modèle, la probabilité de rappel d'un item dépend de la charge cognitive. La charge cognitive impliquée dans une activité ne dépend ni de sa complexité ni de sa durée totale mais de la proportion de temps capturée par la tâche concurrente en fonction du temps total disponible pour l'effectuer (Camos & Barrouillet, 2013). En d'autres mots, la charge cognitive correspond au ratio entre la durée de capture attentionnelle et le temps total disponible pour effectuer cette tâche. Par exemple, si nous avons besoin en moyenne de 400 ms pour déterminer si le chiffre 2 est pair ou impair et que le temps disponible pour effectuer cette tâche concurrente est de 800 ms, la charge cognitive sera de $400/800 = 0.5$. Par conséquent, plus l'attention va être capturée longtemps par la tâche concurrente, moins l'attention sera disponible pour réactiver la trace en mémoire.

En résumé, dans le modèle du TBRS, deux mécanismes permettent de maintenir l'information. Un mécanisme spécifique à l'information verbale, la répétition articulatoire, maintenant les informations sous forme phonologique et un mécanisme plus général de rafraîchissement attentionnel, permettant le maintien de tout type d'information de manière multimodale. Nous allons aborder plus en détail ces mécanismes.

I.4. Les mécanismes de maintien de l'information verbale en mémoire de travail chez l'adulte

Chez l'adulte, des études neurophysiologiques et comportementales montrent qu'il y a deux mécanismes qui nous permettent de maintenir l'information verbale : la répétition articulatoire et le rafraîchissement attentionnel. Dans un premier temps, nous aborderons les évidences apportées par les études en neuro-imagerie puis, dans un second temps l'apport des études comportementales.

I.4.1. Evidences neurophysiologiques

De nombreuses études de neuro-imagerie fonctionnelle, ont mis en évidence une dissociation entre les mécanismes de répétition articulatoire et de rafraîchissement attentionnel (pour une revue, Martin, 2005). Dans une première partie, nous aborderons les résultats obtenus lors d'études effectuées sur des patients sains, montrant deux réseaux neuronaux distincts, sous-tendant les deux mécanismes de maintien de l'information verbale. Dans une deuxième partie, nous verrons les résultats obtenus chez des patients atteints d'une lésion cérébrale isolée, liée à l'un des deux réseaux neuronaux, permettant de déterminer la relevance fonctionnelle de ces zones cérébrales.

Deux réseaux neuronaux distincts

Plusieurs études en neuro-imagerie fonctionnelle soutiennent le fait que deux réseaux neuronaux distincts sous-tendent les deux mécanismes de maintien de l'information verbale (Raye, Johnson, Mitchell, Reeder, & Greene, 2002; Trapp, Mueller, Lepsien, Kramer, & Gruber, 2014).

C'est à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) que Gruber et ses collaborateurs ont approfondi les corrélats neuronaux sous-tendant la mémoire de travail verbale (Gruber, 2001; Gruber & von Cramon, 2001, 2003). En 2001, Gruber a utilisé des tâches de mémorisation de lettres suivies d'un délai. Ce délai était soit vide, soit composé de bips présentés à un rythme régulier. Pendant ces bips, les participants devaient soit compter en rythme (induisant une suppression articulatoire), soit effectuer des tapements de doigt en rythme (induisant une double-tâche). Dans la condition sans suppression

articulatoire, les aires pariétales et prémotrices, latéralisées dans l'hémisphère gauche (comprenant l'aire de Broca), le cortex intrapariétal ainsi que le cervelet droit étaient plus activés que dans la condition avec suppression articulatoire. A l'inverse, indépendamment de la suppression articulatoire, certaines activations étaient communes à toutes les conditions principalement les activations au niveau préfrontal pariétal bilatéral. Ces résultats montrent que certaines aires servent spécifiquement au maintien des informations verbales et ne sont pas ou peu utilisées lors d'informations non verbales.

Par la suite, Gruber et von Cramon (2003) ont cherché à comprendre plus spécifiquement les activations reliées à la répétition articulatoire ou à un mécanisme alternatif sans articulation observées lors de tâches verbales de mémoire de travail. Les participants devaient effectuer des tâches de mémoire de travail verbale (mémoriser des lettres) et visuo-spatiale (mémoriser l'emplacement de lettres sur une matrice de 5x5). Des doubles tâches interférentes avec une stratégie de maintien visuel (lors de suppression visuo-spatiale) ou avec une stratégie de maintien verbal (lors de suppression articulatoire) devaient être effectuées en parallèle. Pendant la tâche de suppression visuo-spatiale, les participants devaient suivre une étoile qui apparaissait à l'écran. Pendant la tâche de suppression articulatoire, les participants devaient répéter les chiffres en continu jusqu'à quatre. Les résultats ont confirmé l'existence de deux réseaux neuronaux, un système spécifique à la répétition articulatoire et un système spécifique au maintien non-articulatoire des informations. Les résultats suggéraient aussi que le réseau préfrontal-pariétal bilatéral permet de maintenir des informations phonologiques même lorsque le mécanisme de répétition articulatoire est entravé. Ces résultats corroborent les résultats de l'étude de Gruber (2001) montrant une activation commune sous-tendant les deux systèmes.

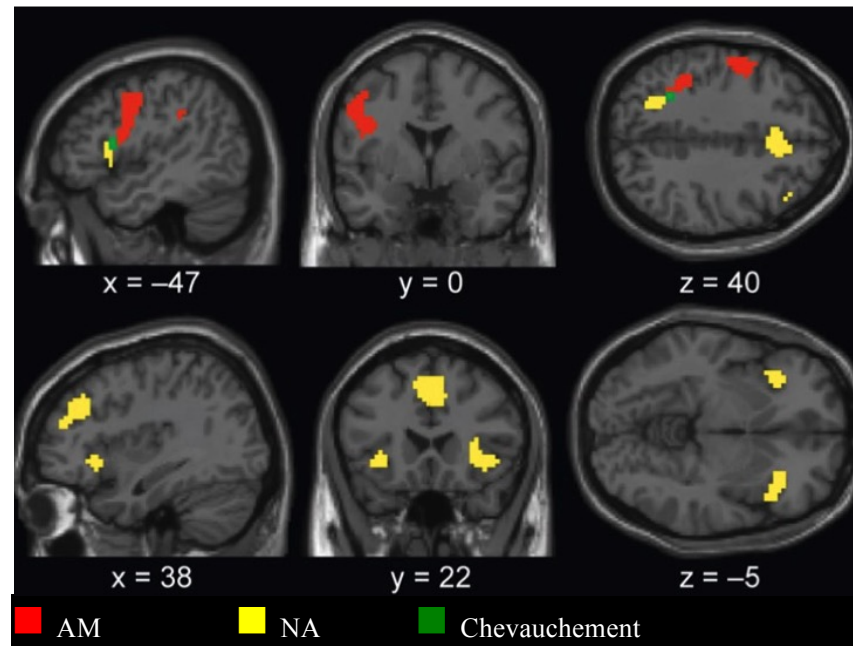


Figure I-7 : Réseaux soutenant le maintien non articuloire (NAM, jaune) et le maintien articuloire (AM, rouge) respectivement. Le chevauchement est indiqué en vert (Trapp et al., 2014).

Plus récemment, cherchant à comprendre les différences de performances entre les deux stratégies de maintien de l'information verbale, l'étude de Trapp et al. (2014) a de nouveau confirmé cette distinction entre deux réseaux neuronaux soutenant l'hypothèse de deux mécanismes distincts (Figure I-7). Cette étude a permis d'ajouter que, lors de tâches complexes, la répétition articuloire serait en plus soutenue par le mécanisme de rafraîchissement attentionnel. Ceci permettrait d'expliquer que lorsque les deux mécanismes sont disponibles, les performances pour maintenir des informations verbales seraient meilleures.

En résumé, les études en neuro-imagerie fonctionnelle soutiennent l'idée de deux réseaux neuronaux distincts. Un système se composant en grande partie des aires de la parole, situées dans l'hémisphère gauche, sous-tend la répétition articuloire et un autre système, constitué de réseaux pré-frontopariétal et pré-fronto-temporal, sous-tend le rafraîchissement attentionnel (Gruber & von Cramon, 2003).

Pertinence fonctionnelle de certaines aires cérébrales

Nous venons de voir à l'aide d'études de neuro-imagerie fonctionnelle sur des patients sains les différences d'activation au niveau neuronal, en fonction de l'utilisation de l'un ou l'autre des mécanismes de maintien. Nous allons maintenant présenter l'une des recherches

qui a permis de déterminer la relevance fonctionnelle de ces aires en étudiant des patients atteints d'une lésion cérébrale isolée.

Trost et Gruber (2012) ont sélectionné deux personnes avec des lésions focalisées, parmi un panel de 500 patients. Le premier patient avait une lésion dans l'hémisphère gauche au niveau de l'aire de Broca et le second présentait une lésion bilatérale le long de la partie antérieure du gyrus frontal moyen (le long du sillon frontal intermédiaire). Ces deux patients devaient effectuer deux variantes d'une tâche de reconnaissance verbale d'items en utilisant deux stratégies de maintien différentes, soit la répétition articulatoire (en répétant les lettres), soit le rafraîchissement attentionnel. Cette dernière stratégie était induite par une suppression articulatoire: Une articulation concurrente rendait la répétition articulatoire indisponible et les patients devaient alors utiliser le rafraîchissement attentionnel. Les résultats ont révélé des déficits spécifiques pour la répétition articulatoire chez le premier patient ayant une lésion au niveau de l'aire de Broca et une altération de l'utilisation du rafraîchissement attentionnel pour le second patient ayant une lésion bilatérale. Ces données soutiennent le lien entre l'activation de l'aire de Broca pour la répétition articulatoire et l'activation de la partie bilatérale antérieure du gyrus frontal médian pour le rafraîchissement attentionnel. Par conséquent, cette étude renforce aussi la dissociation de ces deux systèmes.

I.4.2. Evidences comportementales

Nous venons de voir que les études basées sur les données d'imageries cérébrales montrent que deux systèmes cérébraux distincts et complémentaires sous-tendent la mémoire de travail verbale. Est-ce que cette distinction entre deux systèmes permettant le maintien des informations verbales en mémoire de travail se retrouve aussi au niveau comportemental ?

Indépendance et effet additif des deux mécanismes

En utilisant des tâches d'empan complexe de lecture, Hudjetz et Oberauer (2007) ont montré l'existence d'un mécanisme, distinct de la répétition articulatoire, responsable du maintien de l'information verbale. Dans l'étude d'Hudjetz et Oberauer (2007), les participants devaient lire des phrases (entre 3 et 5 par essai) et mémoriser le dernier mot de chaque phrase, pour le restituer à la fin de l'essai. Une partie des participants devait lire les phrases à leur propre rythme, alors que l'autre partie devait lire de façon continue, sans pause de lecture

entre chaque mot. Les phrases étaient divisées en 4 segments, dont le rythme de présentation variait. Le rythme était soit lent (1890 ms par segment) soit rapide (1323 ms par segment). La lecture continue, parce qu'elle laisse moins de temps pour utiliser la répétition articulatoire, devrait entraver cette dernière, rendant le rappel dans cette condition moins bon. De plus, les auteurs prédisaient une interaction entre le rythme de présentation et le type de lecture (continue ou normal). Dans la condition continue, le rythme de présentation ne devait pas avoir d'impact car le mécanisme de répétition était déjà entravé par la lecture continue. A l'inverse, dans la condition de lecture normale, plus le rythme de présentation des phrases était rapide, moins la répétition articulatoire pouvait être utilisée et par conséquent moins le rappel devait être bon. Les résultats ont montré que dans la condition de lecture normale, le rappel était meilleur que dans la condition de lecture continue, démontrant que lorsque la lecture est continue, la répétition articulatoire est effectivement entravée. Contrairement aux prédictions, le rappel était plus faible lorsque le rythme de présentation était rapide, que lorsqu'il était lent, quel que soit le type de lecture. Le fait que les auteurs aient trouvé un effet significatif du rythme sur le rappel dans la condition de lecture continue, c'est à dire lorsque l'utilisation de la répétition est entravée, montre qu'il existe un mécanisme permettant le maintien des informations verbales différent de la répétition articulatoire. Hudjetz et Oberauer (2007) supposent que cet autre mécanisme serait le rafraîchissement attentionnel décrit précédemment par Barrouillet et al. (2004).

Par la suite, l'étude de Camos, Lagner, et Barrouillet (2009) a montré que deux mécanismes sont effectivement responsables du maintien de l'information verbale, et qu'ils peuvent être utilisés conjointement ou séparément. Camos et al. (2009) ont manipulé l'utilisation de la répétition articulatoire et du rafraîchissement attentionnel lors d'une série de tâches d'empan complexe. Lors de chaque expérience, les participants devaient maintenir des lettres et effectuer des tâches secondaires, pendant lesquelles l'utilisation des mécanismes était manipulée. Lors de la première expérience, explorant l'utilisation du rafraîchissement attentionnel, l'utilisation de la répétition articulatoire était entravée par la réalisation d'une tâche concurrente à voix haute. Lors de cette tâche concurrente, les participants devaient soit lire une opération arithmétique ($5 + 3 = 8$), soit résoudre la même opération ($5 + 3 = ?$) pour manipuler l'utilisation du rafraîchissement attentionnel. La résolution de l'opération entraînant un coût attentionnel plus élevé que la simple lecture de l'opération, le rappel devrait être plus faible dans cette condition. Dans la deuxième expérience, le rafraîchissement attentionnel était entravé via une tâche concurrente demandant beaucoup d'attention, pour

permettre l'exploration de l'utilisation de la répétition articulatoire. Les sujets devaient juger de la parité d'une série de chiffres présentés successivement à l'écran. Cette tâche devait être effectuée, soit silencieusement, uniquement en pressant les touches d'un clavier, soit à voix haute, en disant « pair » ou « impair » pour chaque chiffre, cette dernière condition induisant aussi une suppression articulatoire. Les résultats ont permis de montrer, d'une part, un effet de la manipulation du rafraîchissement attentionnel lorsque la répétition était entravée. Lorsque les participants devaient effectuer la tâche concurrente à haute voix, le rappel de lettre était meilleur lorsque cette tâche était la lecture d'une opération que lorsqu'elle consistait à résoudre une opération. D'autre part, un effet de la suppression articulatoire était présent, lorsque le rafraîchissement attentionnel était entravé. Le rappel était meilleur lorsque la tâche de parité devait être effectuée silencieusement plutôt qu'à haute voix. Ces résultats soutiennent l'hypothèse de deux mécanismes indépendants car l'utilisation du rafraîchissement attentionnel est favorisée lorsque la répétition articulatoire est entravée et, à l'inverse, la répétition articulatoire est utilisée lorsque le rafraîchissement attentionnel est entravé.

Dans les Expériences 3 et 4 de cette même étude, les deux mécanismes étaient manipulés de façon orthogonale (Camos et al., 2009). La variation de la demande attentionnelle était manipulée dans l'Expérience 3 par le type de tâche (tâche de réaction simple vs. complexe) et dans l'Expérience 4 par une tâche de détection de cible vs. une tâche de vérification d'additions. En parallèle, l'utilisation de la répétition articulatoire était manipulée par le fait que les participant(e)s devaient effectuer cette tâche soit silencieusement (en pressant les touches du clavier) soit à voix haute. Les résultats ont confirmé les prédictions, montrant en plus de l'indépendance des mécanismes un effet additif. Les meilleurs résultats étaient obtenus lorsque les deux mécanismes étaient le plus disponibles. Par conséquent, ils peuvent être utilisés conjointement pour obtenir de meilleures performances de rappel.

Conséquences sur le rappel à court terme

Grâce aux précédents résultats, nous savons que deux mécanismes contribuent au maintien de l'information verbale en mémoire de travail : la répétition articulatoire et le rafraîchissement attentionnel. Nous allons maintenant aborder les conséquences liées à l'utilisation de ces deux mécanismes. Nous verrons que les adultes peuvent choisir l'un ou

l'autre de ces mécanismes. Ce choix peut se faire en fonction des contraintes de la tâche et des consignes qu'ils reçoivent, mais aussi en fonction du type de matériel à maintenir.

Choix adaptatif

Camos, Mora, et Oberauer (2011) ont étudié la possibilité de choisir entre les deux mécanismes impliqués dans la mémoire de travail. Ce choix pouvait être imposé par les contraintes de la tâche (Expérience 1) ou par les instructions données aux participants (Expériences 2 et 3). Dans l'Expérience 1, la similarité phonologique des listes de mots et la demande attentionnelle de la tâche concurrente ont été manipulées. Les participants devaient mémoriser des listes de mots composées soit de mots similaires phonologiquement, soit de mots dissimilaires phonologiquement (ne partageant aucun phonème en commun). La tâche concurrente était soit une tâche de réaction simple, soit une tâche de réaction avec un choix à effectuer, demandant plus d'attention que la précédente. Les prédictions supposaient que les participants allaient favoriser l'utilisation du rafraîchissement attentionnel lorsque les mots étaient phonologiquement similaires, car l'utilisation du rafraîchissement attentionnel permet de réduire les confusions phonologiques dues à l'utilisation de la répétition articulatoire. A l'inverse, lorsque la tâche concurrente était très demandante en attention, les participants devaient favoriser l'utilisation de la répétition articulatoire car ce mécanisme demande peu d'attention. Les résultats étaient en accord avec les prédictions et montraient que lorsque l'attention disponible était réduite, un effet de similarité phonologique apparaissait, démontrant que les participants utilisaient la répétition articulatoire. Lorsque la tâche concurrente était une tâche de réaction à choix, le rappel était plus faible lorsque la liste comportait des mots phonologiquement similaires que lorsqu'elle comportait des mots phonologiquement dissimilaires. Ces résultats montrent que lorsque l'attention disponible est faible, les participants favorisent le mécanisme qui nécessite le moins d'attention, la répétition articulatoire.

Dans les deux expériences suivantes, les conditions expérimentales étaient identiques sauf que les consignes étaient d'utiliser soit la répétition articulatoire, en répétant les items (Expérience 2), soit le rafraîchissement attentionnel, en pensant au mot (Expérience 3). En accord avec les résultats précédents, l'effet de similarité phonologique a été observé uniquement lorsque la consigne était d'utiliser la répétition articulatoire (Expérience 2) mais pas lorsque la consigne était d'utiliser le rafraîchissement attentionnel. En résumé, Camos et

al. (2011) ont montré que les jeunes adultes peuvent choisir entre le mécanisme de rafraîchissement attentionnel et le mécanisme de répétition articulatoire pour maintenir l'information verbale. Ce choix dépend des contraintes de la tâche mais aussi de ses instructions.

Répétition articulatoire : Effet du matériel à mémoriser

Les études précédemment présentées supportent l'hypothèse de deux systèmes autonomes. Nous allons aborder maintenant les effets du matériel à mémoriser en fonction du mécanisme utilisé. Dans un premier temps, nous verrons l'impact sur le rappel de la variation de la similarité phonologique du matériel, puis dans un second temps l'impact sur le rappel de la longueur des mots à mémoriser.

L'étude de Camos, Mora, et Barrouillet (2013) a permis d'évaluer l'effet de similarité phonologique, en entravant l'un ou l'autre des mécanismes ou les deux à la fois. Les participants devaient maintenir des listes de mots soit similaires, soit dissimilaires phonologiquement. Dans la première expérience, les participants devaient également effectuer silencieusement une tâche de localisation de carrés demandant de l'attention et par conséquent entravant l'utilisation du rafraîchissement attentionnel. Dans la deuxième expérience, une tâche de suppression articulatoire a été ajoutée pour entraver l'utilisation de la répétition articulatoire. Dans la troisième expérience, l'utilisation des deux mécanismes était entravée, les participants ayant à effectuer en plus de la mémorisation, à la fois la tâche de localisation et celle de suppression articulatoire. Les résultats ont confirmé l'impact négatif sur le rappel de l'augmentation de la demande attentionnelle et de la suppression articulatoire et ont montré que l'effet de similarité phonologique apparaît uniquement lorsqu'il est possible d'utiliser la répétition articulatoire.

De manière similaire, l'étude de Mora et Camos (2013) a soutenu l'hypothèse de deux systèmes autonomes en répliquant les mêmes résultats avec l'effet de longueur de mots. Dans cette étude, la demande attentionnelle de la tâche concurrente et la présence d'une articulation concurrente ont été manipulées orthogonalement, dans le but d'entraver respectivement l'utilisation du rafraîchissement attentionnel et de la répétition articulatoire. La demande attentionnelle concurrente était une tâche de localisation de carrés (en haut ou en bas de l'écran) ayant pour but d'entraver l'utilisation du rafraîchissement attentionnel. Pour induire une suppression articulatoire et par conséquent entraver le mécanisme de répétition les

participants devaient répéter le mot « oui » en suivant le rythme des bips qu'ils entendaient. Les auteurs s'attendaient, comme pour l'effet de similarité phonologique, à une apparition de l'effet de longueur des mots uniquement lorsque l'utilisation de la répétition articulatoire était possible. En accord avec les prédictions, le rappel des mots courts était supérieur au rappel des mots longs uniquement dans la condition sans suppression articulatoire, donc uniquement lorsque la répétition articulatoire était possible. Cette étude a permis de confirmer la dissociation des deux mécanismes et a montré que, lorsque peu d'attention est disponible, les participants vont avoir tendance à utiliser la répétition articulatoire nécessitant peu d'attention. A l'inverse, lorsque le matériel comporte des caractéristiques le rendant plus difficile à maintenir via des codes verbaux (mots similaires phonologiquement ou mots longs), les participants vont avoir tendance à utiliser le mécanisme de rafraîchissement attentionnel. Les caractéristiques phonologiques des mots (longueur, similarité) vont donc avoir un impact sur le mécanisme qui va être utilisé pour maintenir l'information verbale.

Rafraîchissement attentionnel : Effet de la sémantique

En plus des caractéristiques phonologiques, les caractéristiques sémantiques stockées en mémoire à long terme peuvent avoir un impact sur la mémorisation. Les connaissances existantes en mémoire à long terme peuvent faciliter le maintien des informations connues par rapport aux informations inconnues. Par exemple, lorsque des éléments peuvent être regroupés en chunks ayant une signification, ils seront plus facilement retenus. De plus, d'après l'hypothèse proposée par Craik et Lockhart (1972), plus le traitement des items à mémoriser est profond à l'encodage, plus les traces en mémoire de ces items seront résistantes à l'oubli. Le traitement sémantique permet un encodage plus profond, et par conséquent un meilleur maintien des informations comparé à un traitement plus superficiel, par exemple sensoriel (ex., visuel).

Loaiza et Camos (in prep.) ont étudié l'impact du niveau de traitement d'indices (sémantiques ou rythmiques) donnés lors du rappel en fonction du type de stratégie utilisée. Les indices correspondant à la sonorité d'un mot (rime) seraient des indices plus superficiels alors que les indices sémantiques seraient plus profonds. Cette étude était composée de deux expériences. Dans la première expérience, aucun type de stratégie n'était instruit et dans la deuxième expérience, les participants étaient instruits à utiliser, soit le rafraîchissement attentionnel, soit la répétition articulatoire. Lors d'une tâche de Brown-Peterson, les

participants devaient maintenir des mots, chacun suivi d'une tâche concurrente de localisation de carrés.

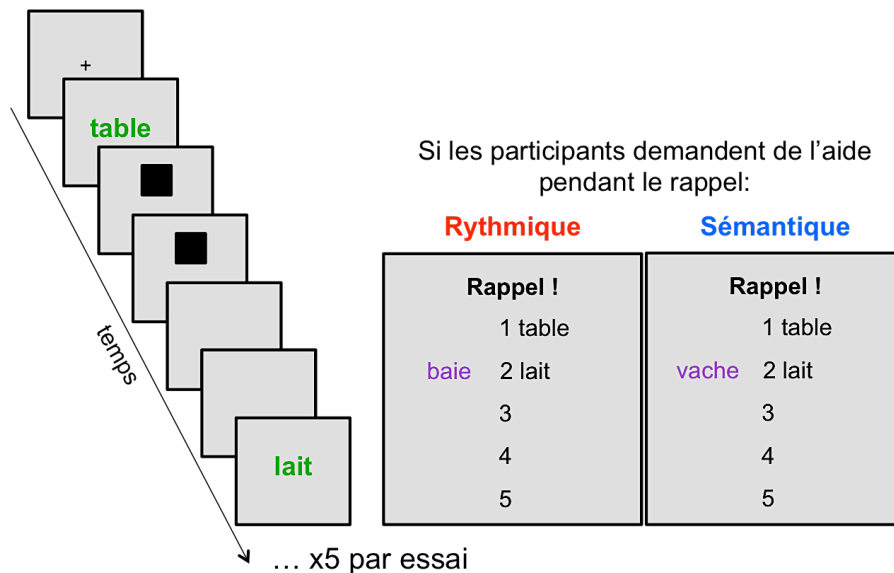


Figure I-8 : Représentation de la tâche présentée dans l'expérience de Loaiza & Camos (in prep.) et exemple d'indice phonologique ou sémantique pouvant apparaître lors de la demande d'aide.

La caractéristique de cette étude était que lors du rappel dans l'ordre des items présentés, les participants pouvaient demander de l'aide en appuyant sur une touche du clavier lorsqu'ils n'arrivaient pas à retrouver les items. Cette aide était soit un mot qui rimait (traitement superficiel), soit un mot de la même catégorie sémantique (traitement profond) en fonction du groupe dans lequel le participant était assigné. Par exemple, pour retrouver le mot «lait», l'indice sémantique pouvait être «vache» et l'indice rythmique «baie» (Figure I-8). Dans la première expérience l'effet du type d'indice était significatif: Les participants du groupe avec les indices sémantiques avaient un meilleur rappel que les participants du groupe avec les indices qui rimaient. Dans la deuxième expérience, cet effet était significatif uniquement lorsque les participants avaient pour instruction d'utiliser le rafraîchissement attentionnel et pas lorsque les participants étaient instruits à utiliser la répétition. De manière générale, l'instruction à utiliser le rafraîchissement a amélioré le rappel et augmenté l'effet des indices par rapport à la condition sans instruction. Ces résultats confirment l'importance d'un traitement profond (sémantique), par rapport à un traitement superficiel (phonologique) pour améliorer le rappel. Le bénéfice obtenu lors d'indices sémantiques était supérieur par rapport au bénéfice obtenu lors d'indices rimant ce qui est en accord avec la théorie du niveau

de traitement (Craik & Lockhart, 1972). De plus, l'effet du type d'indice, augmentant lors de l'instruction à utiliser le rafraîchissement par rapport à la condition sans instruction, a permis de mettre en lien l'amélioration des représentations sémantiques et l'utilisation du rafraîchissement attentionnel. A l'inverse, l'utilisation de la répétition faisait disparaître l'effet du type d'indices, a permis de relier l'amélioration des représentations phonologiques et la répétition. Par conséquent, le rafraîchissement attentionnel encourage les représentations sémantiques et la répétition articuloire les représentations phonologiques. Cette étude, a de nouveau confirmé la présence de deux mécanismes distincts pour maintenir l'information verbale en mémoire de travail.

Conséquences sur le rappel à long terme

Nous venons de voir que les connaissances présentes en mémoire à long terme peuvent avoir un impact sur le maintien des informations en mémoire de travail. Nous allons maintenant voir quel est l'impact du maintien des informations en mémoire de travail sur la mémoire à long terme. Plus exactement, nous allons voir que le choix d'utiliser la répétition articuloire ou le rafraîchissement attentionnel a non seulement un impact sur le rappel à court terme mais aussi sur le rappel à long terme.

Impacts des opportunités d'utiliser le rafraîchissement attentionnel

McCabe (2008) a montré que le rappel à long terme était meilleur pour les items mémorisés lors de tâches d'empan complexe que lors de tâches d'empan simple. Il explique cet avantage via son modèle le « covert retrieval model » qui propose que les sujets profitent de chaque pause entre les épisodes de traitements pour récupérer les informations à mémoriser. Lors de tâches d'empan simple, les indices temporels et contextuels seraient faibles et aucune pause ne permettrait de rafraîchir les informations. Par conséquent, les participants auraient peu d'opportunités pour rafraîchir à la fois les items à mémoriser et le lien entre ces items et leur contexte lors de l'encodage. A l'inverse, lors de tâches d'empan complexe, les participants auraient plus d'opportunités pour rafraîchir les informations et renforcer le lien entre les items et leur contexte. Les traces à mémoriser seraient plus rafraîchies et par conséquent plus solides et durables dans le temps ce qui expliquerait un meilleur rappel à long terme.

Pour manipuler le nombre d'opportunités de rafraîchissement et l'impact de cette manipulation sur le rappel à long terme, Loaiza et McCabe (2012) ont modulé la position des items à mémoriser. Les auteurs supposaient que plus les items étaient suivis de pause, plus ils avaient la possibilité d'être rafraîchis, plus leur trace en mémoire allait perdurer dans le temps. La Figure I-9 illustre ces différentes opportunités. Dans le premier type de tâche (a), chaque mot à mémoriser était précédé d'un problème arithmétique à résoudre, les opportunités de rafraîchir l'information, lors de cette tâche concurrente, déclinaient jusqu'à la dernière position. Dans le deuxième type (b), les items étaient tous présentés à la fin, après les problèmes arithmétiques. Les opportunités de rafraîchissement étaient donc nulles comme lors d'une tâche d'empan simple. Dans le dernier type (c), les items à maintenir étaient tous massés au début, suivis par les opérations, comme lors de tâche de Brown-Peterson (cf. page 5). Les items présentés au début d'un essai avaient plus d'opportunités de rafraîchissement que les items présentés à la fin, devant par conséquent mieux tenir dans le temps. Comme le rafraîchissement permettrait de renforcer les traces dans le temps, la manipulation du nombre d'opportunités devrait impacter uniquement le rappel à long terme.

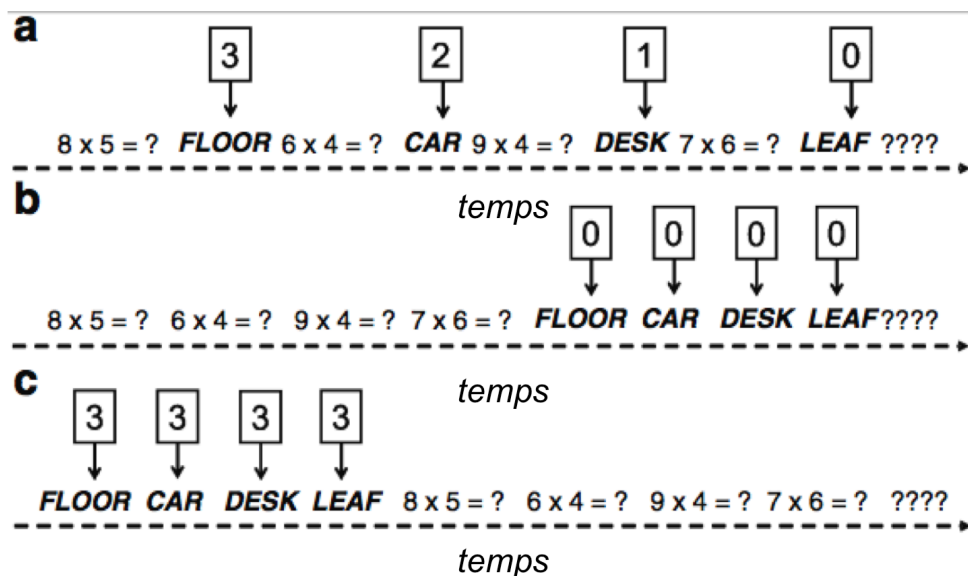


Figure I-9 : Une illustration des trois types d'essais de l'Expérience 3 de Loaiza & McCabe (2012) : (a) récupération espacée, (b) mots massés à la fin, et (c) mots massés au début. Les chiffres indiquent le nombre d'opportunités de rafraîchissement de l'essai pour chaque position.

Les résultats de l'étude suggéraient que les performances de rappel avec un délai étaient dépendantes de la position initiale de l'item, ce qui n'était pas le cas lors du rappel immédiat. En effet, alors que le rappel immédiat pour les items espacés ou massés au début ou

à la fin était similaire quelle que soit la position de l'item, le rappel avec délai diminuait significativement jusqu'à la dernière position (Figure I-10). Les items ayant plus d'opportunités de rafraîchissement (Figure I-9), comme les items massés au début d'un essai, étaient proportionnellement mieux rappelés que les items massés à la fin d'un essai. Cet effet se retrouve également dans la condition des items espacés (a), avec une proportion de rappel diminuant avec la diminution du nombre d'opportunités de rafraîchissement.

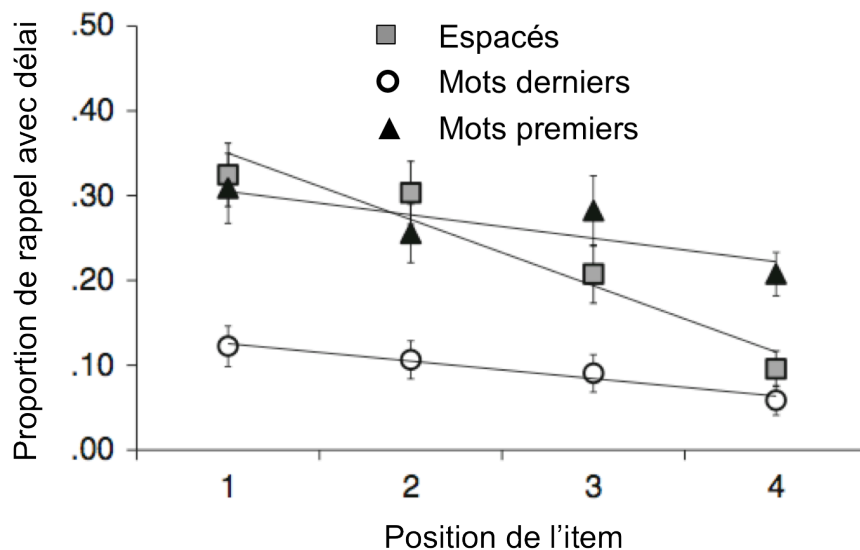


Figure I-10 : Proportion de rappel avec délai en fonction de la position initiale pendant la tâche d'empan pour les conditions espacées, mots massés en premier, mots massés en dernier (Loaiza & McCabe, 2012, Expérience 3).

En conclusion, l'utilisation de la répétition articulatoire ou du rafraîchissement attentionnel a un impact différent sur le rappel à long terme. Le rafraîchissement attentionnel permet un meilleur maintien des informations pour un rappel à long terme que la répétition articulatoire. Cet effet renforce les résultats précédents soutenant l'idée de deux systèmes autonomes distincts permettant le maintien des informations verbales.

De manière similaire, Loaiza et McCabe (2013) ont montré que le mécanisme de répétition articulatoire et le mécanisme de rafraîchissement attentionnel affectaient de façon distincte la mémorisation à court terme et celle à long terme. En effet, dans cette étude les auteurs ont manipulé l'utilisation de ces deux mécanismes et ont examiné les conséquences de cette manipulation à la fois lors du rappel immédiat et lors du rappel à long terme. L'Expérience 1 avait pour but de manipuler les opportunités d'utiliser la répétition

articulatoire, en manipulant le rythme de lecture d'un problème arithmétique (simultané ou continu), comme dans l'expérience d'Hudjetz et Oberauer (2007). L'Expérience 2 avait pour but de manipuler les opportunités d'utiliser le rafraîchissement attentionnel, en jouant sur le nombre de problèmes arithmétiques (0, 1 ou 2) qui précédaient chaque mot à mémoriser. Les résultats ont confirmé l'impact de la manipulation des deux mécanismes lors du rappel immédiat. Dans l'Expérience 1, le rappel diminuait dans la condition de lecture continue et dans l'Expérience 2 le rappel diminuait avec l'augmentation du nombre de problèmes. Lors du rappel à long terme, uniquement la manipulation du rafraîchissement attentionnel (Expérience 2) avait un impact sur le rappel, mais pas le rythme de lecture (Expérience 1). Le maintien à l'aide du rafraîchissement attentionnel était plus stable dans le temps que le maintien à l'aide de la répétition. Loaiza et McCabe (2013) ont donc montré qu'en supprimant l'opportunité d'utiliser l'autorépétition via la suppression articulatoire, le rappel consécutif à un délai n'était pas impacté. Cependant, lorsque les auteurs ont varié les opportunités d'utiliser le mécanisme de rafraîchissement attentionnel, le rappel à long terme était réduit (Loaiza & McCabe, 2012, 2013).

Impacts du coût cognitif de la tâche concurrente

Un autre élément ayant un impact en mémoire de travail et pouvant avoir un impact sur la mémoire à long terme est le coût cognitif de la tâche concurrente. En mémoire de travail, Vergauwe, Barrouillet, et Camos (2010) ont montré que les informations verbales et visuo-spatiales partagent un ensemble commun de ressources. Quelle que soit la nature des informations à maintenir (verbale ou visuo-spatiale) et quelle que soit la nature de la tâche concurrente, le rappel est dépendant du coût cognitif de la tâche concurrente. Ce coût n'est pas lié à la durée totale ou à la complexité de la charge cognitive, mais il représente la proportion de temps utilisé pour accomplir la tâche concurrente en fonction du temps total disponible pour l'effectuer. Ce coût cognitif se calcule en faisant le ratio entre la durée de capture attentionnelle et le temps total disponible pour effectuer cette tâche.

Camos et Portrat (2014) ont évalué l'impact en mémoire à long terme du coût cognitif de la tâche concurrente dans une tâche d'empan complexe. Cet élément n'avait pas été manipulé dans les études précédentes (Loaiza & McCabe, 2012, 2013; McCabe, 2008). Nous venons de voir que le rappel à long terme dépend du nombre d'opportunités de rafraîchissement (Loaiza & McCabe, 2012, 2013; McCabe, 2008) et Barrouillet, Bernardin,

Portrat, Vergauwe, et Camos (2007; Barrouillet & Camos, 2012, 2015) ont montré que plus le coût cognitif de la tâche concurrente est élevé plus l'utilisation du rafraîchissement est réduite. Camos et Portrat (2014), se basant sur ces études supposent que le rappel immédiat et le rappel à long terme dépendent du coût cognitif de la tâche concurrente. Par conséquent, les auteurs ont mené une étude comportant deux expériences pendant lesquelles les participants devaient effectuer une tâche d'empan complexe comportant des séries de 5 mots et une tâche concurrente, dont le coût cognitif variait. Dans la première expérience le coût cognitif de la tâche était manipulé par la nature de la tâche, avec soit une tâche de réaction simple soit une tâche de jugement de parité. Dans la seconde expérience le coût cognitif de la tâche était manipulé par son rythme de présentation, lent ou rapide. Par conséquent, que le rappel soit immédiat ou à long terme, il devrait diminuer en fonction du coût cognitif quelle que soit sa manipulation (nature de la tâche ou rythme de présentation). De plus, l'introduction d'une articuloire concurrente (en effectuant la tâche concurrente à haute voix) a été testée, avec pour but de retrouver une diminution du rappel lors d'une articulation concurrente lors du rappel immédiat et aucun impact de la suppression articuloire lors du rappel à long terme, comme dans l'étude de Loaiza et McCabe (2013). Les résultats, en accord avec Loaiza et McCabe (2013), allaient dans le sens des prédictions avec un impact de la suppression articuloire lors du rappel immédiat mais pas lors du rappel à long terme. A l'inverse, quelle que soit la manipulation du coût cognitif (nature de la tâche ou rythme de présentation), l'augmentation du coût cognitif réduisait le rappel, à la fois lors du rappel immédiat et du rappel à long terme.

Cette étude confirme l'impact du maintien en mémoire de travail sur le maintien en mémoire à long terme et met en avant le fait que le maintien d'un item en mémoire à long terme dépend du coût cognitif de la tâche concurrente lors du maintien en mémoire de travail.

L'utilisation des mécanismes de répétition articuloire et de rafraîchissement attentionnel en mémoire de travail a donc un impact différent sur le maintien en mémoire de travail, mais aussi en mémoire à long terme. Cet élément renforce encore plus la dissociation entre le mécanisme de rafraîchissement attentionnel et le mécanisme de répétition articuloire.

I.5. Le développement des mécanismes de maintien de l'information verbale.

Nous venons de voir que de nombreuses études, tant sur le plan neurologique que sur le plan comportemental, soutiennent le fait que l'adulte utilise deux mécanismes pour maintenir des informations verbales en mémoire de travail. Nous savons maintenant que ces deux mécanismes peuvent être utilisés conjointement ou séparément chez l'adulte. Mais comment se développent-ils ? A ce jour uniquement trois études ont examiné le développement de ces deux mécanismes conjointement : celles de Tam et al. (2010), de Magimairaj et Montgomery (2012) et de Mora et Camos (2015), que nous aborderons par la suite. Plusieurs études ont cependant étudié le développement de l'un ou l'autre de ces mécanismes. Nous allons aborder ces différentes études dans ce sous-chapitre. Nous aborderons dans un premier temps le développement de la répétition articulatoire, dans un second temps nous évoquerons celui du rafraîchissement attentionnel, puis nous finirons par les études sur le développement conjoint de ces deux mécanismes.

I.5.1. Répétition articulatoire

De nombreuses études, notamment dans les années 90, se sont penchées sur le développement de la répétition articulatoire. L'hypothèse la plus soutenue concernant le développement de la répétition articulatoire est qu'il y aurait un changement qualitatif dans l'utilisation de ce mécanisme autour de 7 ans (Gathercole, 1998; Gathercole & Adams, 1994; Henry, 1991). Cependant, de récentes études remettent en cause cette hypothèse (Al-Namlah, Fernyhough, & Meins, 2006; Henry, Messer, Luger-Klein, & Crane, 2012; Jarrold & Tam, 2011; Tam et al., 2010). Ces deux points de vue seront abordés lors d'études manipulant les effets connus pour leurs liens avec l'utilisation de la boucle phonologique, comme l'articulation concurrente, l'effet de longueur des mots, l'effet de similarité phonologique et l'effet de l'écoute inattentive.

Changement qualitatif

Le changement qualitatif est mis en évidence, principalement grâce à l'étude des effets consécutifs à l'utilisation de la répétition articulatoire : par exemple, l'effet de longueur des

mots et l'effet de similarité phonologique. Allik et Siegler (1976) ont montré un effet significatif de la longueur de mot chez les enfants de plus de 8 ans, alors que les enfants de moins de 6 ans n'étaient pas sensibles à cet effet. En effet, les plus de 8 ans rappelaient en moyenne plus les listes composées d'items courts que celles composées d'items longs. De même, Gathercole et Adams (1994) ne sont pas arrivées à mettre en évidence dans leur étude l'utilisation de stratégie de répétition chez des enfants de 4 et 5 ans mais uniquement à partir de l'âge de 7 ans. Les études d'Halliday, Hitch, Lennon, et Pettipher (1990) et d'Hitch, Halliday, Schaafstal, et Heffernan (1991), évaluant les codes utilisés pour mémoriser, ont testé l'effet de la similarité phonologique et l'effet de similarité visuelle dans une seule et même tâche. Les participants devaient maintenir des items présentés visuellement ou auditivement et les rappeler verbalement. L'effet de similarité phonologique entraînait une réduction du rappel des items similaires phonologiquement par rapport aux items dissimilaires phonologiquement. L'effet de similarité visuelle entraînait une réduction du rappel pour des items similaires visuellement par rapport aux items dissimilaires visuellement. Les résultats obtenus ont montré un effet de similarité visuel chez les plus jeunes (avant 7 ans), alors que les enfants de plus de 7 ans étaient influencés par l'effet de similarité phonologique. Les enfants auraient donc tendance à maintenir des items présentés visuellement, sous forme visuelle avant 7 ans alors qu'après 7 ans ils auraient tendance à recoder et maintenir ces items sous forme verbale (cf. Henry et al., 2012, pour une remise en cause de ce résultat).

Changement plus graduel

Contrairement à la plupart des articles portant sur l'évolution développementale de la répétition articulatoire, Tam et al. (2010) ont mis en évidence un effet de similarité phonologique avant l'âge de 7 ans. Dans leur étude, deux expériences ont été conduites sur deux groupes d'enfants âgés de 6 et de 8 ans. Dans la première expérience, les enfants devaient effectuer quatre types de tâches en mémorisant de 2 à 6 mots monosyllabiques. Ces quatre tâches étaient des tâches d'empan simple, d'empan avec délai, de Brown-Peterson et d'empan complexe (Figure I-11).

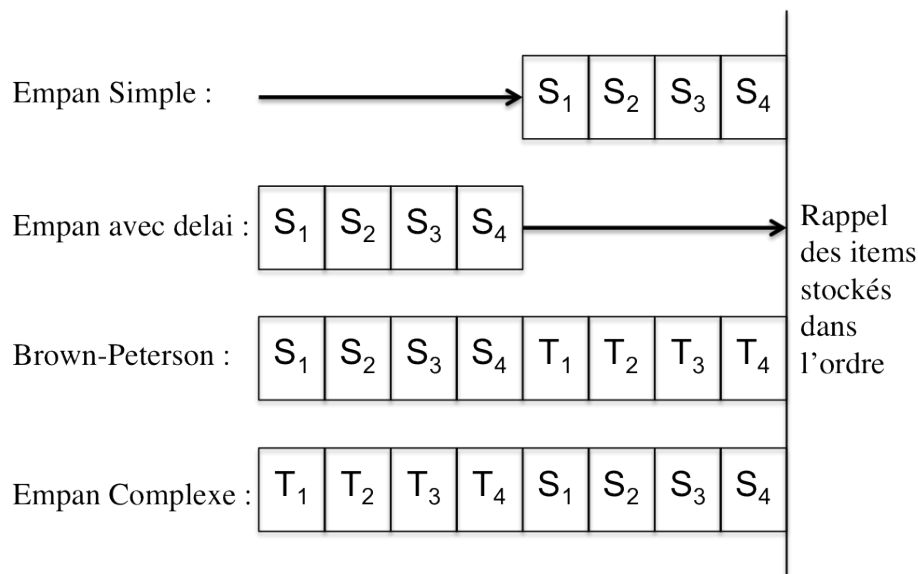


Figure I-11 : Représentation schématique des quatre tâches de mémoire présentées dans l'Expérience 1 de Tam et al. (2010) : Empan simple, Empan avec délai, Brown-Peterson, et Empan complexe. "S" et "T" désignent respectivement un objet de stockage et un objet de traitement, et chaque chiffre en indice indique le nombre d'éléments de stockage ou de traitement. Chaque essai représenté ici est à une longueur de l'espace de quatre éléments de stockage.

Lors de la tâche d'empan simple, les enfants devaient rappeler les mots directement après le dernier mot présenté. Lors de la tâche d'empan avec délai, ils devaient rappeler les mots suite à une période de temps déterminée par le nombre d'items à mémoriser (3 secondes par items en plus). Le délai était donc proportionnel au nombre d'item à mémoriser. Par exemple, lorsque trois items étaient présentés, le délai était de 9 secondes car 3 items x 3 secondes = 9 secondes. La tâche de Brown-Peterson était similaire à la tâche d'empan avec délai, sauf que les enfants devaient effectuer une tâche concurrente pendant ce délai. De manière similaire, lors de la tâche d'empan complexe, les participants devaient effectuer en plus la tâche concurrente, mais cette fois-ci chaque item à maintenir était suivi par une période de 3 secondes pendant laquelle les enfants devaient effectuer la tâche concurrente (Figure I-11). Lors de cette tâche concurrente, les participants devaient déterminer si des pièces de monnaie qui apparaissaient à l'écran étaient en or ou en argent. Pour répondre, ils devaient presser le bouton correspondant sur un boîtier à boutons. Dans la même tâche, les auteurs ont évalué l'effet de similarité phonologique. Les enfants devaient mémoriser des items présentés visuellement. Les mots à mémoriser étaient présentés avec des mots phonologiquement similaires lors de la moitié des essais, et avec des items phonologiquement dissimilaires lors de l'autre moitié des essais. Les résultats ont montré une diminution du

rappel avec l'ajout du délai vide par rapport à la tâche d'empan simple. Cet effet était significativement plus grand à 6 ans qu'à 8 ans. L'introduction d'une tâche concurrente pendant ce délai réduisait le rappel chez tous les enfants indépendamment de leur âge. Aucune différence significative n'apparaissait entre la tâche de Brown-Peterson et la tâche d'empan complexe. Le type de paradigme utilisé pour évaluer la mémoire de travail n'avait donc pas d'impact.

Dans la seconde expérience, quatre tâches ont également été utilisées : une tâche d'empan simple, une tâche d'empan avec délai, et deux tâches de Brown-Peterson, l'une avec une tâche concurrente verbale et l'autre avec une tâche non verbale. La tâche concurrente verbale avait pour but d'entraver l'utilisation de la répétition articulatoire et la tâche concurrente non verbale avait pour but d'entraver le rafraîchissement attentionnel tout en laissant la répétition articulatoire disponible. Pour évaluer en même temps l'effet de similarité phonologique, les participants devaient maintenir des séries d'images dont les noms étaient soit similaires, soit dissimilaires phonologiquement. Lors de la tâche concurrente verbale, les enfants devaient nommer la couleur du cercle qui apparaissait au centre de l'écran, le cercle pouvant être rouge ou vert. Lors de la tâche concurrente non-verbale, les enfants devaient presser le bouton situé à droite ou à gauche de l'écran en fonction de la localisation du cercle qui apparaissait à l'écran (droite ou gauche) et ce, indépendamment de la couleur du cercle. Les résultats de la deuxième expérience ont renforcé ceux de la première en soulignant le fait que le rappel des deux groupes d'enfants était affecté par l'effet de similarité phonologique. Cet effet disparaissait lors d'une tâche concurrente verbale, donc lorsque la tâche concurrente induisait une suppression articulatoire. Les enfants ont donc bien tendance à recoder et maintenir les informations présentées visuellement sous forme phonologique, et ce dès l'âge de 6 ans. Cette tendance augmente entre 6 et 8 ans car l'effet de similarité phonologique était plus grand chez les 8 ans que chez les 6 ans.

Concernant les effets de longueur des mots et de rimes chez les enfants, aucune étude n'a étudié ces effets lors de tâche d'empan complexe. Cependant, de nombreuses études ont montré l'effet de longueur des mots lors de tâche d'empan simple (par exemple, Hitch & Halliday, 1983). La modalité de présentation aurait un impact sur l'âge de l'apparition de l'effet de longueur des mots chez les enfants. En effet, d'après Hitch et Halliday (1983), l'effet de longueur des mots apparaîtrait vers 6 ans pour les items présentés auditivement et vers 8 ans pour les items présentés visuellement. A l'inverse, pour Henry, Turner, Smith, et Leather (2000), les items visuels seraient sensibles à l'effet de longueur des mots dès 4 ans,

avant que cet effet apparaisse vers 7 ans pour les items présentés auditivement. Concernant les effets de rime, deux études ont montré un effet délétère chez les enfants en rappel immédiat (Hall, Wilson, Humphreys, Tinzmann, & Bowyer, 1983; Hasselhorn & Grube, 2003). Dans l'étude de Hall et al. (1983, Expérience 3) des enfants dyslexiques et normoalexiques devaient mémoriser des listes de noms familiers rimant ou ne rimant pas. Le rappel des enfants était impacté par l'effet de rime, les noms familiers rimant étaient moins bien rappelés que les noms qui ne rimaient pas. De plus, la diminution du rappel due à l'effet de rime était supérieure pour les enfants normoalexiques. En résumé, la plupart des études soutiennent l'idée d'un changement qualitatif dans l'utilisation de la répétition articulatoire autour de l'âge de 7 ans, relevant l'impact d'effets en lien avec cette utilisation uniquement chez des enfants de plus de 7 ans et pas chez les plus jeunes. Cependant, de récentes études remettent en cause ce résultat relevant des effets de similarité phonologique avant l'âge de 7 ans (Henry et al., 2012; Tam et al., 2010).

I.5.2. Rafrâichissement attentionnel

Nous venons de voir l'évolution développementale de la répétition articulatoire mais qu'en est-il du rafrâichissement attentionnel ? Peu d'études se sont penchées sur la question. Les études concernant l'utilisation du rafrâichissement attentionnel ont principalement porté sur deux des trois facteurs limitant le fonctionnement de la mémoire de travail, identifiés par Barrouillet et al. (2004; Camos & Barrouillet, 2011, 2013) qui pourraient aussi sous-tendre les changements développementaux et les différences interindividuelles (Camos & Barrouillet, 2013). Ces facteurs seraient directement liés au mécanisme de rafrâichissement attentionnel : l'accroissement de la quantité d'attention disponible et l'efficacité du mécanisme d'alternance attentionnelle. L'attention disponible serait comme un pôle de ressource permettant d'activation des items à mémoriser et des traitements à effectuer.

Les études de Barrouillet et Camos (2001) et Gavens et Barrouillet (2004) suggèrent un impact de l'efficacité du traitement sur la quantité d'attention disponible. Partant du fait qu'une tâche est plus facile pour des enfants plus âgés, cette tâche devrait être plus rapidement effectuée par ces enfants plus âgés. L'efficacité du traitement s'améliorant avec l'âge, les enfants plus âgés auraient besoin de moins de temps pour effectuer le traitement concurrent. Pour tester cet élément, Gavens et Barrouillet (2004, Expérience 1) ont manipulé dans des tâches d'empan complexe la demande attentionnelle et la durée totale de la tâche

concurrente chez des enfants de 9 et 11 ans. La tâche concurrente était d'une durée courte ou longue et consistait soit en une tâche d'opérations continues, soit en une tâche de suppression articulaire (Figure I-12). Lors de la tâche d'opérations continues, les enfants devaient à partir du premier chiffre présenté, soustraire ou ajouter le chiffre suivant (par exemple + 1 ou - 2).

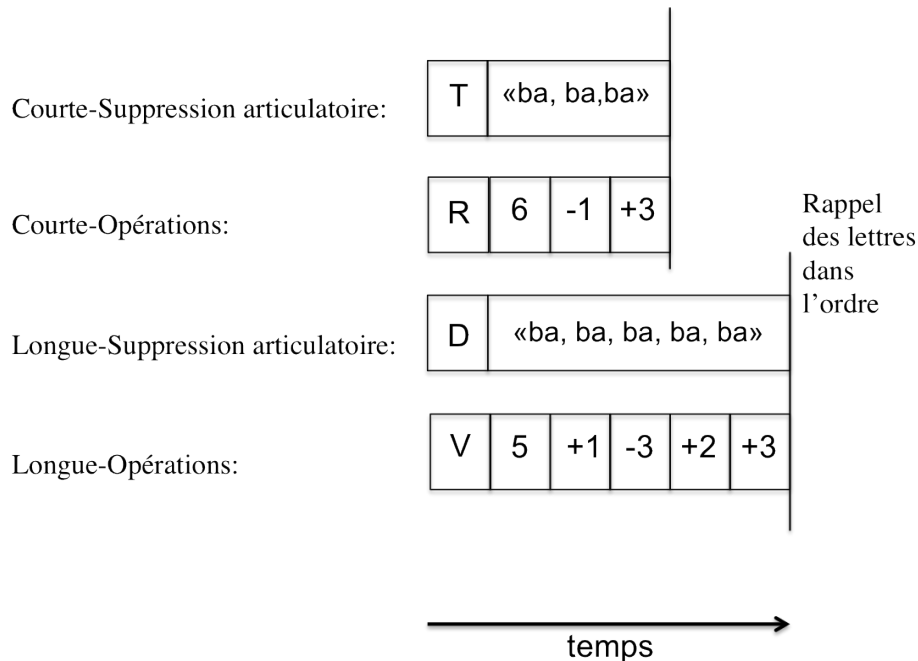


Figure I-12 : Représentation schématique des différentes conditions de l'Expérience 1 de Gavens & Barrouillet (2004)

Dans la condition « courte », deux chiffres devaient être ajoutés ou soustraits à partir du premier chiffre présenté alors que dans la condition « longue », quatre chiffres devaient être ajoutés ou soustraits. Lors de la tâche de suppression articulaire, les enfants devaient lire la syllabe « ba » présentée à l'écran à un rythme fixe. Les résultats obtenus montraient un meilleur rappel dans la condition de suppression articulaire que dans la condition d'opérations continues, sans interaction avec l'âge. Ce résultat suggère que le coût attentionnel de la tâche concurrente a un impact sur le rappel quel que soit l'âge. De plus, les enfants plus âgés ont eu un meilleur rappel indépendamment du type de tâche. Cependant, l'effet principal de l'âge n'est pas forcément dû à un traitement plus rapide. En effet, Gavens et Barrouillet (2004, Expérience 3) ont testé le rappel en contrôlant le niveau de difficulté de la tâche concurrente en fonction de l'âge des enfants. Leur but était de savoir si l'amélioration du rappel avec l'âge était due à une augmentation des ressources globales avec l'âge ou à une

plus grande efficacité lors des traitements concurrents. Les différences développementales persistaient, même en adaptant le niveau de difficulté de la tâche concurrente à l'âge. Un autre facteur pourrait donc sous-tendre le développement de la mémoire de travail. D'après Gavens et Barrouillet (2004), ce facteur pourrait être une augmentation globale des ressources disponibles.

Nous venons de voir que la quantité d'attention disponible semble augmenter avec l'âge. Nous allons maintenant voir, via le développement de l'efficacité du mécanisme d'alternance attentionnel, celui du rafraîchissement attentionnel chez les enfants de plus de 7 ans. Par la suite, nous nous intéresserons à l'efficacité du rafraîchissement attentionnel chez les enfants entre 5 et 7 ans.

Utilisation du rafraîchissement attentionnel après 7 ans

Barrouillet, Gavens, Vergauwe, Gaillard, et Camos (2009) ont analysé l'utilisation du rafraîchissement attentionnel chez des enfants âgés de 8 à 14 ans dans une étude regroupant trois expériences. Dans la première expérience, en utilisant une tâche de lecture de chiffre en plus du maintien de lettre, les auteurs ont manipulé le coût cognitif de la tâche, en variant le rythme de présentation des chiffres à lire. Les chiffres étant présentés à un rythme de 2, 1.2, 0.8 et 0.4 par seconde. Les résultats montrent que le rythme de présentation de la tâche concurrente réduit le rappel de tous les enfants quel que soit l'âge (Figure I-13). De plus, l'effet du rythme était significativement supérieur pour les enfants plus âgés. L'écart entre les deux groupes d'âge augmentait avec la diminution de la charge cognitive. Le rappel des enfants de 8 ans, diminuait moins avec l'augmentation de la charge cognitive que le rappel des adolescents de 14 ans. Ce résultat serait dû au fait que les enfants plus âgés sont plus aptes à déplacer leur attention entre le traitement et le stockage. Les enfants plus jeunes auraient à l'inverse plus de difficultés à effectuer ce déplacement attentionnel. Nous verrons par la suite que les enfants encore plus jeunes, d'environ 5 ans ne sont pas influencés par la manipulation de la charge cognitive (Barrouillet et al., 2009; Camos & Barrouillet, 2011; pour une synthèse, Camos & Barrouillet, 2013).

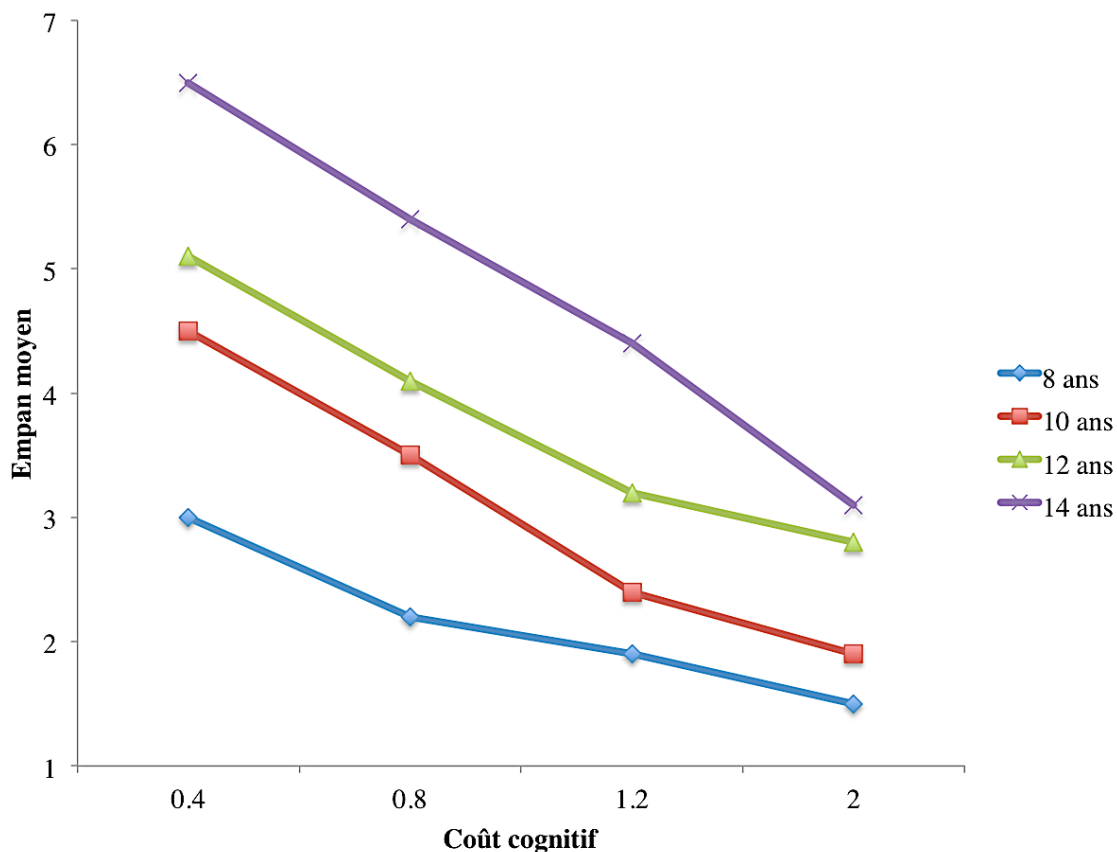


Figure I-13 : Empan moyen en fonction du coût cognitif de la tâche concurrente et de l'âge (Barrouillet et al., 2009, Expérience 1).

Dans l'Expérience 1 de Barrouillet et al. (2009), les résultats pouvaient être dus à l'amélioration de l'efficacité du traitement avec l'âge. Par conséquent, dans la deuxième expérience, les auteurs ont voulu étudier de manière plus précise l'impact du rythme de présentation, en contrôlant les différences développementales liées à la vitesse de traitement. Cette expérience portait sur les deux groupes d'âge extrêmes (8 et 14 ans). Elle était similaire à la précédente avec une adaptation du temps de lecture de chiffre nécessaire en fonction de l'âge. Les temps ont été contrôlés pour induire la même charge cognitive à tous les groupes d'âge. L'activité de lecture occupait ainsi pour chaque groupe la même proportion de temps. Les résultats étaient congruents avec ceux de l'Expérience 1 : Le rappel des deux groupes augmentait avec la diminution de la charge cognitive, donc plus la charge cognitive était faible plus le rappel était bon et ce quel que soit l'âge. Cependant, l'interaction entre l'âge et la charge cognitive n'était pas significative. Les auteurs en ont déduit que l'effet d'interaction entre l'âge et le rythme de présentation dans l'Expérience 1 était en grande partie dû à des vitesses de lecture différentes entre les enfants de 8 ans et les adolescents de 14 ans. De plus,

l'écart entre le rappel des deux groupes qui augmentait avec la diminution de la charge cognitive, confirme que le rafraîchissement des traces en mémoire serait de plus en plus efficace avec l'âge.

Utilisation du rafraîchissement attentionnel autour de 6 ans

La troisième expérience a été menée sur deux groupes d'enfants plus jeunes de 5 et 7 ans (Barrouillet et al., 2009, Expérience 3). Les enfants devaient mémoriser le nom d'animaux présentés visuellement (et nommés à haute voix par l'expérimentateur). Ils devaient effectuer en parallèle une tâche de dénomination de couleur de smileys (Figure I-14).

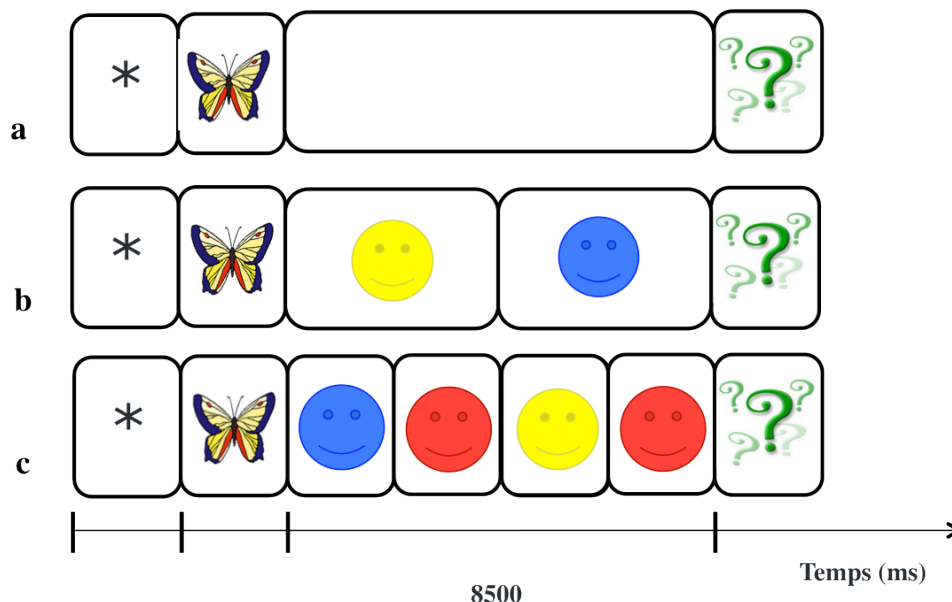


Figure I-14 : Illustration des trois conditions : (a) pour 0 couleur, (b) pour 2 couleurs et (c) pour 4 couleurs.

Le nombre de couleurs à nommer variait entre zéro, deux et quatre couleurs pendant un intervalle constant. Les enfants n'utiliseraient pas spontanément de stratégie de maintien avant l'âge de 7 ans lors de tâches d'empan simple (Hitch, Halliday, Dodd, & Littler, 1989). Par conséquent, chez les enfants de 5 ans, la présence d'une tâche concurrente comprenant deux ou quatre smileys devait perturber les performances de rappel des enfants par rapport à la condition sans couleur. Les conditions avec deux ou quatre couleurs ne devaient pas entraîner de différence de rappel car les enfants ne pouvaient pas utiliser les pauses pour rafraîchir les traces en mémoire. A l'inverse, les enfants de 7 ans, pourraient utiliser les

pauses pour rafraîchir les traces en mémoire. Par conséquent, l'augmentation du nombre de couleurs devait entraîner une diminution du rappel pour les plus de 7 ans. Les résultats, congruents avec les prédictions, ont révélé que le rappel des enfants de 5 ans était réduit en présence d'une tâche secondaire. Cependant, la charge cognitive induite par cette tâche secondaire n'avait pas d'impact sur les performances de rappel. Contrairement au rappel des enfants de 5 ans, le rappel des enfants de 7 ans diminuait avec l'augmentation du nombre de couleurs à dénommer. L'utilisation du mécanisme de rafraîchissement attentionnel semble donc apparaître entre 5 et 7 ans. En continuité avec cette étude, Camos et Barrouillet (2011b) ont manipulé à la fois la charge cognitive et la durée de la tâche concurrente lors d'une expérience similaire. Pour cela, lors de la tâche concurrente, une ou deux couleurs étaient présentées dans un intervalle de deux secondes, ou deux couleurs dans un intervalle de quatre secondes (Figure I-15).

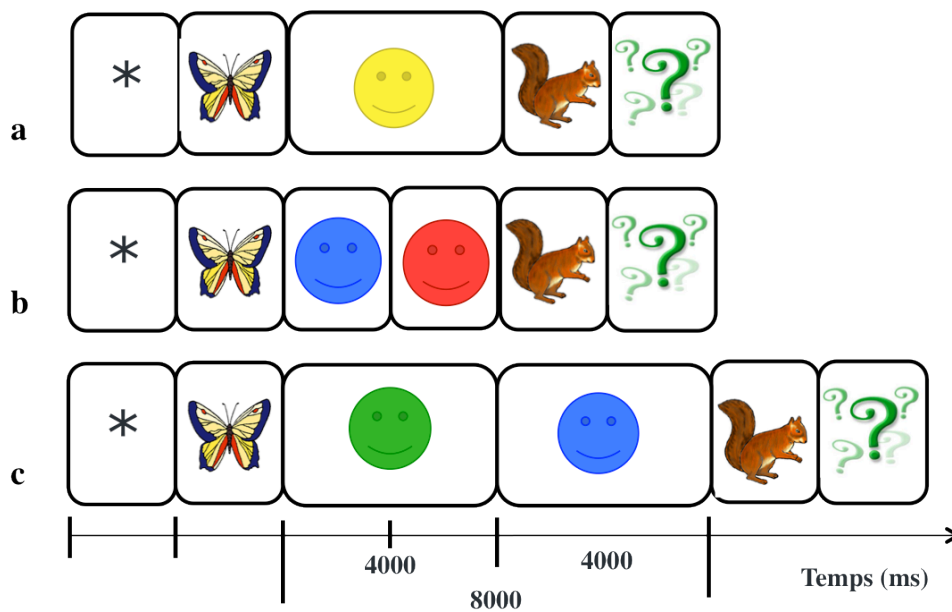


Figure I-15 : Illustration de trois essais: (a) pour la condition 1 couleur, (b) pour la condition courte avec 2 couleurs et (c) pour la condition longue avec 2 couleurs (Camos & Barrouillet, 2011b).

Les résultats ont montré que le rappel des enfants de 7 ans dépendait de la charge cognitive de la tâche concurrente et pas de sa durée. A l'inverse, le rappel des enfants de 5 ans diminue avec l'augmentation de la durée de la tâche concurrente, quelle que soit sa charge cognitive. Ces résultats soutiennent l'hypothèse selon laquelle un changement de processus permettant le maintien de l'information en mémoire de travail interviendrait entre 5 et 7 ans.

Cette hypothèse suppose que les enfants de 5 ans utiliseraient un maintien de l'information plutôt passif, alors qu'à 7 ans un maintien actif serait mis en jeu.

I.5.1. Rafrâichissement attentionnel et répétition articulatoire

Les études sur le développement des mécanismes se sont principalement intéressées à la répétition articulatoire. Certaines études se sont tout de même penchées sur le développement du rafrâichissement attentionnel, mais peu d'études ont investigué l'utilisation conjointe des deux mécanismes chez l'enfant (Magimairaj & Montgomery, 2012; Mora & Camos, 2015; Tam et al., 2010)

Magimairaj et Montgomery (2012) ont fait passer des tâches de mémoire à court terme (rappel de chiffre, rappel de blocs), des tâches évaluant la vitesse générale de traitement (temps de réaction aux sons, réaction sons-images), des tâches évaluant le contrôle attentionnel (switching du focus attentionnel) et des tâches de mémoire de travail verbale (empan d'écoute, empan de comptage). Ils ont utilisé une procédure de modélisation linéaire générale (GLM :General Linear Modeling). Cette procédure leur a permis de déterminer la part de variance spécifique à chaque prédicteur et la part de variance commune entre différents prédicteurs chez des enfants âgés de 7 à 11 ans. Les analyses ont révélé que l'utilisation de la répétition articulatoire, définie comme le stockage verbal, et le rafrâichissement attentionnel, défini comme un contrôle attentionnel général, contribuent chacun à une variance indépendante et unique chez les enfants. Cependant, les auteurs n'ont pas étudié l'évolution développementale. L'étude de Mora et Camos (2015) a aussi investigué l'utilisation des deux mécanismes. Cette étude portait sur un seul groupe d'enfants âgés de 8 ans. Ils devaient mémoriser des listes de mots, phonologiquement similaire ou dissimilaire, lors de tâches d'empan complexe pendant lesquelles l'utilisation des mécanismes de maintien de l'information verbale était manipulée. Les mécanismes étaient soit tous les deux disponibles, soit tous les deux entravés, soit un seul des deux mécanismes était entravé (Figure I-16). La disponibilité du rafrâichissement attentionnel était entravée par une tâche concurrente demandant beaucoup d'attention alors que la disponibilité de la répétition articulatoire était entravée par une articulation concurrente. La tâche concurrente consistait à localiser des smileys qui apparaissaient successivement en haut ou en bas de l'écran et l'articulation concurrente consistait à dire « oui » à chaque tonalité entendue dans un casque audio.

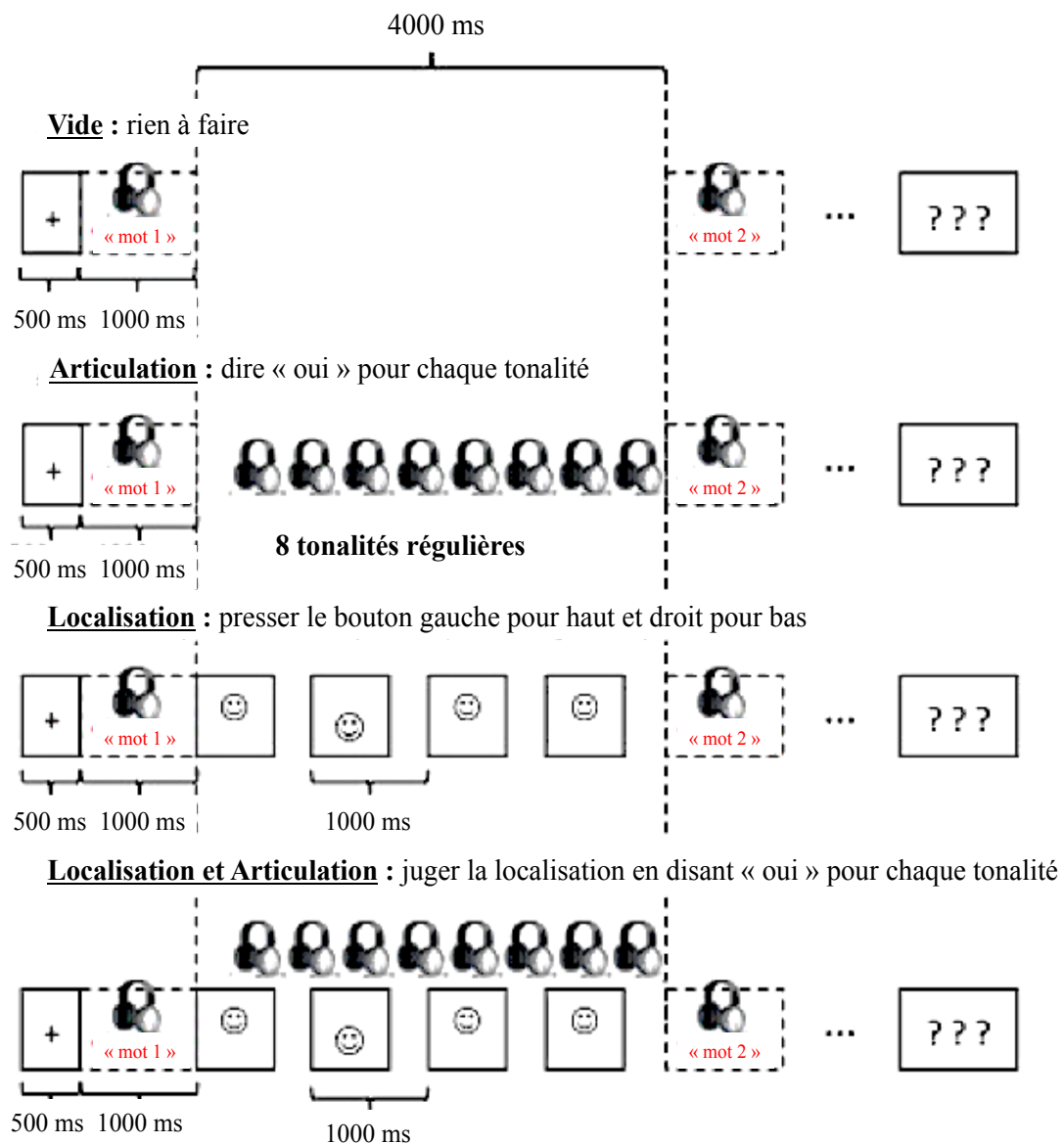


Figure I-16 : Illustration des quatre tâches d'empan complexe utilisées dans l'expérience de Mora et Camos (2015)

En accord avec Barrouillet et al. (2009), Magimairaj & Montgomery (2012) et Tam et al. (2010), les résultats montrent que les enfants de 8 ans sont capables d'utiliser le rafraîchissement attentionnel ou la répétition articulatoire pour maintenir de l'information verbale. En effet, comme dans l'étude de Tam et al. (2010), présentée précédemment, les listes de mots phonologiquement similaires étaient moins bien rappelées que les listes de mots phonologiquement dissimilaires. Des plus, Mora et Camos (2015) révèlent que les deux mécanismes sont indépendants chez les enfants, répliquant les résultats obtenus chez l'adulte

(Camos et al., 2011; Mora & Camos, 2013). Cependant, aucune variation de l'effet de similarité phonologique n'a été observée lors de la manipulation de la disponibilité des mécanismes. Bien que Mora et Camos (2015) et Magimairaj et Montgomery (2012) répliquent l'indépendance des deux mécanismes, ils ne se penchent pas sur leurs évolutions développementales. Seule l'étude de Tam et al. (2010) a investigué l'évolution développementale conjointe de ces deux mécanismes. Cette étude portant uniquement sur deux groupes d'âge (6 et 8 ans), le but de cette thèse était d'accroître cette examination.

I.6. Résumé

Cette synthèse de la littérature nous a permis de voir que l'ensemble des recherches chez l'adulte met en évidence deux mécanismes permettant de maintenir de l'information verbale en mémoire de travail, la répétition articulatoire et le rafraîchissement attentionnel (par exemple, Camos et al., 2011; Mora & Camos, 2013; Trapp et al., 2014). En effet, les données d'imagerie cérébrale et les études comportementales témoignent de la présence de deux systèmes distincts qui sous-tendent la mémoire de travail verbale. Les études concernant le développement de ces mécanismes sont moins nombreuses. Seules trois études ont examiné la relation entre ces deux mécanismes chez l'enfant (Magimairaj & Montgomery, 2012; Mora & Camos, 2015; Tam et al., 2010). Une seule de ces études a examiné la relation entre ces deux mécanismes et les changements développementaux (Tam et al., 2010). Cependant, l'ensemble des études concernant ces deux mécanismes montrent qu'ils seraient disponibles à l'âge de 7 ans (e.g., Barrouillet et al., 2009; Hitch et al., 1991). Toutefois, même si la plupart des études concernant la répétition articulatoire soutiennent l'idée d'un changement qualitatif autour de l'âge de 7 ans, de récentes recherches remettent en question cette hypothèse (Al-Namlah et al., 2006; Ford & Silber, 1994; Henry et al., 2012; Jarrold & Tam, 2011; Tam et al., 2010).

I.7. L'étude

Nous venons de voir que 7 ans est un âge charnière et que l'utilisation de la répétition articulatoire et du rafraîchissement attentionnel semble changer autour de cet âge. De plus, le développement conjoint des deux mécanismes a été très peu étudié. Dans cette thèse, nous nous pencherons donc sur l'évolution développementale de ces deux mécanismes et nous

examinerons la question d'un changement qualitatif autour de l'âge de 7 ans. Dans un premier temps, lors de tâches d'empan complexe en manipulant les deux mécanismes de manière orthogonale. Dans un deuxième temps, lors de tâches de Brown-Peterson en manipulant l'introduction d'un délai et d'une tâche concurrente plus ou moins demandant en attention. Dans un troisième temps, ces mécanismes étaient manipulés lors de tâche d'empan complexe et les effets de similarité phonologique, de rime et de longueur des mots ont été également analysés.

I.7.1. Les stratégies de maintien lors de tâches d'empan complexe

Dans une première partie (Chapitre II), l'évolution développementale du rafraîchissement attentionnel et de la répétition articulatoire a été explorée, via une manipulation orthogonale de leurs utilisations lors de tâches d'empan complexe. Pour ce faire, nous avons manipulé la possibilité d'utiliser le rafraîchissement attentionnel en variant le coût attentionnel de la tâche concurrente. En parallèle, nous avons manipulé l'utilisation de la répétition articulatoire en variant la présence de la suppression articulatoire.

Dans la première expérience, des enfants de 6, 7 et 9 ans ont dû maintenir des séries de 1 à 6 consonnes. Pendant la tâche concurrente, ils devaient effectuer, soit une tâche de discrimination de couleur, soit une tâche de catégorisation, sur des images présentées à l'écran. Lors de la tâche de discrimination de couleurs, les enfants devaient dire si l'image était en couleur ou en noir et blanc. Pendant la tâche de catégorisation, ils devaient dire si l'image représentait un animal ou non. La tâche de catégorisation induisait un coût cognitif plus élevé que la tâche de discrimination de couleur, car les enfants avaient besoin d'identifier l'image avant de pouvoir la catégoriser. Pour manipuler l'utilisation de la répétition articulatoire, la tâche concurrente devait être effectuée soit silencieusement, uniquement en pressant les touches correspondantes sur le clavier, soit à voix haute, en pressant les touches et en énonçant la réponse en même temps. Dans la seconde expérience, le même paradigme a été utilisé chez des enfants de 6, 7 et 8 ans. Pour induire une différence plus forte de la demande attentionnelle entre les deux conditions, une tâche de réaction simple a été utilisée dans la deuxième expérience pour contraster avec la tâche de discrimination de couleur. Lors de cette tâche de réaction simple, les enfants devaient réagir le plus rapidement possible en pressant une touche lorsqu'une image apparaissait à l'écran. Comme Barrouillet et al. (2007) l'ont montré, une tâche de réaction simple n'induit pas une demande attentionnelle.

Contrairement à l'introduction d'un délai vide cette tâche permet de contraster la demande attentionnelle tout en gardant le même type de réponse motrice et l'ajout d'une double-tâche. De plus, comme certains enfants ont eu du mal à maintenir des lettres présentées visuellement lors de la première expérience, ils devaient dans cette seconde expérience maintenir 4 séries de 4 mots présentés auditivement.

Dans ces deux expériences, l'augmentation de la demande attentionnelle devrait réduire la disponibilité de l'attention et par conséquent l'utilisation du rafraîchissement attentionnel. Le rappel devrait donc être réduit avec l'augmentation de la demande attentionnelle. Cependant cet effet devrait se produire uniquement sur le rappel des enfants qui utilisent ce mécanisme, donc uniquement à partir de l'âge de 7 ans d'après l'étude de Camos et Barrouillet (2011) ou dès 6 ans d'après l'étude de Tam et al. (2010). En parallèle, l'introduction d'une suppression articulatoire, devait entraver l'utilisation de la répétition articulatoire. Le rappel devait donc décliner lorsque l'un ou l'autre des mécanismes était entravé et ce déclin devait être encore plus important lorsque les deux mécanismes étaient entravés. De plus, nous pouvions supposer une utilisation de plus en plus efficace de ces deux mécanismes avec l'âge. Cet efficacité devrait entraîner pour les enfants les plus âgés un déclin plus important lorsque le rafraîchissement attentionnel ou la répétition articulatoire était entravé que pour les enfants les plus jeunes. Ces derniers utiliseraient de façon moins efficace, voir n'utiliseraient peut être pas du tout ces mécanismes. Par conséquent, le fait d'entraver ces mécanismes entraînerait un déclin plus faible des performances de rappel. De plus, cette conception expérimentale nous permettrait de contrôler l'absence d'interaction entre les deux mécanismes obtenue dans l'étude de Mora et Camos (2015) chez les enfants de 8 ans et d'étendre ces résultats aux enfants âgés de 6 ans à 9 ans.

I.7.2. Les stratégies mises en place lors de Tâches de Brown-Peterson.

Dans la deuxième partie expérimentale de ce travail (Chapitre III), l'utilisation des mécanismes de répétition articulatoire et de rafraîchissement attentionnel a été manipulée de manière orthogonale lors de tâches de Brown-Peterson. Ce type de tâche permet de présenter les items massés au début des essais et par conséquent de manipuler plus facilement le temps compris entre la présentation de l'ensemble des items et le rappel. D'après le modèle du TBRS, si aucun mécanisme de maintien de l'information n'est mis en place pendant ce délai, l'activation des traces en mémoire décline avec le temps. Chez l'enfant, Camos et Barrouillet

(2011) ont montré que leur rappel déclinait avec l'augmentation du temps de la tâche concurrente. Par conséquent, comme le rappel des enfants de moins de 7 ans est sensible au temps, les enfants n'utiliseraient pas de stratégie active de maintien et retiendraient l'information uniquement grâce à un maintien passif ne résistant pas au déclin temporel (Barrouillet et al., 2009). Des résultats similaires ont été obtenus avec des enfants âgés de 4 à 6 ans (Bertrand & Camos, 2015). Les auteures ont montré que ces enfants n'utilisaient pas de maintien actif des items car lors de l'introduction d'un délai vide le rappel diminuait. Cette diminution a également été observée dans la première expérience de l'étude de Tam et al. (2010) sur des enfants de 6 ans. Cependant, la seconde expérience de l'étude de Tam et al. (2010) n'a pas permis de confirmer ce déclin. Ces résultats contradictoires pourraient être dus à une co-variation du délai avec la longueur des listes lors de la seconde expérience de Tam et al. (2010). Par conséquent, la durée du délai a été contrôlée dans nos deux expériences. Le but de cette étude était donc d'explorer l'utilisation des deux mécanismes de maintien de l'information verbale chez les enfants âgés de 6 à 9 ans via l'impact de l'introduction d'un délai vide ou d'une tâche concurrente sur le rappel.

La première expérience de cette deuxième étude, l'Expérience 3, concernait quatre groupes d'enfants de 6, 7, 8 et 9 ans. Ils devaient mémoriser des séries de 1 à 6 chiffres. Suite à la présentation des chiffres, ils devaient effectuer une tâche de localisation de carrés. Ces carrés étaient présentés soit sur la moitié haute, soit sur la moitié basse de l'écran. Pour varier la possibilité d'utiliser le rafraîchissement attentionnel, le coût attentionnel était manipulé par l'introduction d'un délai vide et par l'introduction d'une tâche concurrente de jugement de localisation. L'utilisation de la répétition articulatoire était manipulée par la présence ou non de suppression articulatoire lors de la tâche concurrente de jugement. Dans la condition avec suppression articulatoire, les enfants devaient, en plus de presser sur le bouton correspondant à leur réponse, dire leur choix à haute voix.

Dans l'Expérience 4, les enfants de 6, 7 et 8 ans devaient aussi maintenir des séries de 1 à 6 chiffres. Cependant, pendant la tâche concurrente, ils devaient déterminer si un smiley qui apparaissait à l'écran était rouge ou bleu. La possibilité d'utiliser le rafraîchissement attentionnel était manipulée à la fois par l'introduction ou non de cette tâche concurrente et par la variation du coût cognitif de cette tâche. Les enfants avaient à déterminer la couleur de 1 ou de 2 smileys par essai. L'utilisation de la répétition articulatoire était manipulée de façon similaire à l'Expérience 3, par la présence ou non de suppression articulatoire. Cependant la suppression articulatoire était induite par une tâche de répétition itérative du mot « oui » et

non par le fait d'effectuer la tâche concurrente à haute voix. Cette manipulation a été choisie pour permettre la même quantité de suppression articulatoire indépendamment du nombre de smileys.

D'après le modèle du TBRS, l'introduction d'un délai devrait affecter les performances de rappel des enfants dès l'âge de 6 ans car ils n'utiliseraient pas de maintien actif et l'activation des traces en mémoire déclinerait avec le temps. A l'inverse d'après l'étude de Tam et al. (2010), les enfants ne devraient pas être affectés par l'introduction d'un délai vide car ils utiliseraient dès l'âge de 6 ans un maintien actif. Cependant, d'après les deux approches, l'introduction d'une tâche concurrente entraînerait une diminution du rappel, qui n'aurait toutefois pas la même signification. Pour Tam et al. (2010), cette diminution serait due à l'impact du détournement d'attention sur la tâche concurrente alors que pour Camos et Barrouillet (2011), elle serait due à l'ajout de tâches supplémentaires. En d'autres termes, pour Tam et al. (2010), lors de l'introduction d'une tâche secondaire, l'attention ne pourrait plus se porter sur les éléments à mémoriser car elle serait détournée sur la tâche concurrente alors que pour Camos et Barrouillet (2011), l'attention devrait se diviser entre les deux tâches.

Pour permettre de clarifier ce propos, une seconde expérience a été conduite. Elle permettait de manipuler en plus de l'introduction d'une tâche concurrente, le coût attentionnel de celle-ci. Cette manipulation a été effectuée lors d'une tâche de discrimination de couleur, comportant une ou deux couleurs. La condition avec deux couleurs devait demander plus d'attention que la condition avec une couleur, ce qui devait entraver encore plus l'utilisation du rafraîchissement attentionnel. D'après Tam et al. (2010) cette manipulation devrait avoir un impact sur le rappel dès 6 ans, l'augmentation de la demande attentionnelle entraînant une moins bonne utilisation du rafraîchissement attentionnel et par conséquent un rappel plus faible. A l'inverse d'après le modèle du TBRS, l'augmentation de la demande attentionnelle ne devrait impacter le rappel des enfants qu'à partir de l'âge de 7 ans, les plus jeunes n'utilisant pas le rafraîchissement attentionnel. En parallèle, la présence d'une suppression articulatoire, devait entraver l'utilisation de la répétition articulatoire. Comme dans la première partie expérimentale, nous supposons que le rappel devait décliner lorsque la répétition articulatoire était entravée. Dès l'âge de 7 ans, les enfants devraient pouvoir utiliser les deux mécanismes, et par conséquent, le déclin du rappel devait être encore plus important lorsque les deux mécanismes étaient entravés. De plus, nous supposons un déclin du rappel plus important lors de l'entravement des mécanismes avec l'augmentation de l'âge, les enfants plus âgés utilisant de façon plus efficace ces deux mécanismes.

I.7.3. Effet de la longueur des mots, de la similarité phonologique et des rimes.

La troisième et dernière étude était consacrée à l'exploration conjointe de ces deux mécanismes, en manipulant le type de matériel à mémoriser. La manipulation du type de matériel peut conduire à différents effets, comme l'effet de similarité phonologique, l'effet de rime et l'effet de la longueur des mots. Ces effets sont le résultat de l'utilisation de codes phonologiques pouvant entraîner par exemple des confusions phonologiques et permettent d'établir l'utilisation de la répétition articulatoire. Les effets de similarité phonologique et de rime étaient étudiés dans l'Expérience 5, alors que l'Expérience 6 étudiait l'effet de la longueur des mots. Ces deux expériences portaient sur des enfants de 6, 7 et 8 ans. Lors de tâches d'empan complexe les enfants devaient mémoriser des séries de trois mots présentés auditivement. Pendant le maintien, ils devaient effectuer soit une tâche de réaction simple, soit une tâche de réaction à choix. Lors de la tâche de réaction simple, ils devaient appuyer sur une touche dès qu'une image apparaissait à l'écran. Lors de la tâche de réaction à choix, ils devaient effectuer une tâche de discrimination de couleur et dire si l'image était en noir et blanc ou en couleur. La tâche de réaction à choix demandant plus d'attention, elle devait donc plus entraver l'utilisation du rafraîchissement attentionnel pour la mémorisation des mots que la tâche de réaction simple. La répétition articulatoire était, cette fois-ci, manipulée à la fois par la présence ou non de suppression articulatoire et par la manipulation du matériel à mémoriser.

Dans l'Expérience 5, les mots à mémoriser étaient soit dissimilaires (aucun phonème en commun), soit similaires phonologiquement (avec le phonème central commun), soit les deux derniers phonèmes étaient similaires créant des rimes. Nous supposons, en accord avec l'effet de similarité phonologique, que les mots dissimilaires allaient être mieux rappelés que les mots similaires. Cependant, nous n'avons pas d'hypothèse claire concernant l'effet des rimes. Les recherches précédentes ayant démontré que les rimes peuvent soit aider soit entraver le rappel (Copeland & Radvansky, 2001; Fournet et al., 2003; Hall et al., 1983; Hasselhorn & Grube, 2003), nous n'avons pas d'attente claire par rapport à l'impact de l'effet de rime sur le rappel, les rimes pourraient aider ou entraver le rappel.

Dans l'Expérience 6, les mots à mémoriser étaient soit des mots longs de trois syllabes, soit des mots courts composés d'une syllabe. Nous supposons que l'effet de la longueur des mots allait être présent uniquement lorsque l'utilisation de la répétition articulatoire était possible. Par conséquent, nous nous attendions à ce que les mots courts

soient mieux rappelés que les mots longs lorsque la répétition articulatoire n'est pas entravée via une suppression articulatoire.

Comme les effets de longueur des mots, de similarité phonologique et de rimes établissent l'utilisation de la répétition articulatoire, nous supposons qu'ils seraient présents uniquement lorsque l'utilisation de la répétition articulatoire était possible. Ces effets devaient donc disparaître dans la condition avec suppression articulatoire. Basé sur les résultats de Mora et Camos (2015), nous supposons aussi que les enfants plus âgés (8 ans) pourraient, comme les adultes, s'adapter au matériel à mémoriser et utiliser le rafraîchissement attentionnel lorsque les caractéristiques des mots ne permettaient pas d'utiliser la répétition articulatoire (mots similaires, longs ou qui riment). Les effets de similarité phonologique, de longueur des mots et de rimes apparaîtraient uniquement dans la condition sans suppression articulatoire demandant peu d'attention (tâche de réaction simple).

Tableau I-1 : Synthèse des manipulations effectuées en fonction des parties expérimentales et des expériences.

	Exp.	Groupe d'âge	Nombre d'enfants testés	Type de tâche	Listes à mémoriser par condition	Articulation concurrente	Tâche concurrente
Chapitre II	Exp.1	6, 7, 9	180	Empan complexe	3 listes de 1 à 6 lettres	imbriquée	Discrimination de couleur vs. Catégorisation
	Exp.2	6, 7, 8	247	Empan complexe	4 listes de 4 mots	imbriquée	Détection d'une image d'animal vs. Discrimination de couleur
Chapitre III	Exp.1	6, 7, 8, 9	280	Brown-Peterson	3 listes de 1 à 6 chiffres	imbriquée	Introduction d'une tâche de localisation de carrés (haut ou bas)
	Exp.2	6, 7, 8	124	Brown-Peterson	3 listes de 1 à 6 chiffres	répétition du mot "oui"	Introduction d'un tâche de dénomination de couleur avec 1 ou 2 smileys (rouge ou bleu)
Chapitre IV	Exp.1	6, 7, 8	182	Empan complexe	6 listes de 3 mots	imbriquée	Détection d'une image d'animal vs. Discrimination de couleur
	Exp.2	6, 7, 8	131	Empan complexe	6 listes de 3 mots	imbriquée	Détection d'une image d'animal vs. Discrimination de couleur

**Chapitre II : Les mécanismes de maintien de
l'information verbale en mémoire de travail
chez l'enfant**

Maintenance Mechanisms in Children's Verbal Working Memory

ABSTRACT

Previous research in adults has indicated two maintenance mechanisms of verbal information in working memory, i.e., articulatory rehearsal and attentional refreshing. However, only three studies have examined their joint contribution to children's verbal working memory. The present study aimed at extending this line of research by investigating the developmental changes occurring from 6 to 9 years old. In two experiments using complex span tasks, children of three different age groups maintained letters or words while performing a concurrent task. The opportunity for attentional refreshing was manipulated by varying the attentional demand of the concurrent task. Moreover, this task was performed either silently by pressing keys or aloud, the latter inducing a concurrent articulation. As expected, recall performance increased strongly with age. More interestingly, concurrent articulation had a detrimental effect on recall even in 6-year-old children, this effect being stronger with age. Introducing a concurrent attention-demanding task impaired recall performance at all ages, but variation in its demand only affected recall from age 7 onwards. Finally, the effect of the availability of rehearsal and of attentional refreshing did not interact at any age. This suggested an independence of the two mechanisms in the maintenance of verbal information in children's working memory. Implications for the development of rehearsal use and for the role of attention in working memory are discussed.

Key words: Working Memory; Rehearsal; Refreshing; Development; Attention.

Working memory is a system dedicated to the maintenance and the processing of information. Past research has shown that two maintenance mechanisms are involved in the maintenance of verbal information in working memory: articulatory rehearsal and attentional refreshing (Camos et al., 2009). The former was extensively described in Baddeley's multi-component model (e.g., Baddeley, 1986), whereas the latter is an attention-based mechanism at the heart of the time-based resource-sharing model (e.g., Barrouillet et al., 2004). Recent studies have further indicated that these two mechanisms are independent in young adults, having an additive effect on recall performance (Camos et al., 2009; Hudjetz & Oberauer, 2007). Thus, the present study investigated the implication of these two mechanisms in children's maintenance of verbal information by examining the age-related changes that may occur around 7 years of age. This is an especially important age range to examine as several studies have suggested that articulatory rehearsal and attentional refreshing emerge at 7 (Barrouillet et al., 2009; Camos & Barrouillet, 2011; Gathercole & Adams, 1993; Gathercole, Adams, & Hitch, 1994).

In adults, neural and behavioral evidence have highlighted the distinction between an attention-based mechanism of refreshing and a more specialized system dedicated to the maintenance of verbal information, articulatory rehearsal. Neurophysiological studies have shown that the two mechanisms are implemented in distinct brain areas. Indeed, whereas articulatory rehearsal was reflected in the ventrolateral prefrontal cortex [VLPFC, Brodmann's area (BA) 44], the involvement of attention in the maintenance of various types of information was reflected in the dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC, BA 9) (Johnson et al., 2005). Using fMRI studies, Gruber and von Cramon (2003) showed that verbal working memory was represented by two systems: "A left-lateralized premotor-parietal network underlying verbal rehearsal and a bilateral anterior-prefrontal/inferior-parietal network subserving non-articulatory maintenance of phonological information" (p. 808). More recently, Trost and Gruber (2012) reported congruent findings in patients with specific brain lesions, while Trapp et al. (2014) demonstrated differential neural bottlenecks for each maintenance mechanism. These neuropsychological studies established the dissociation of two complementary brain systems underlying verbal working memory in adults.

Moreover, behavioral studies confirmed this distinction (Camos et al., 2009; Camos et al., 2011; Hudjetz & Oberauer, 2007). First, Hudjetz and Oberauer (2007) showed that another mechanism maintains memory traces even when articulatory rehearsal was impeded

in a reading span task. In this study, segments of sentences appeared successively on screen at a slow or fast pace. Recall performance was reduced during a fast compared to a slow pace, even when a continuous reading condition impaired rehearsal. This finding suggested that another mechanism permits the maintenance of verbal information. Secondly, Camos et al. (2009) showed that rehearsal and refreshing are both responsible for the maintenance of verbal information, and they can operate independently and jointly in adults. In a series of experiments using complex span tasks, adults had to remember letters while performing concurrent task. During this concurrent task, the availability of the two maintenance mechanisms was manipulated. To impede rehearsal, a concurrent articulation was induced by asking participants to perform the concurrent task aloud instead of silently. The availability of attentional refreshing was varied by presenting participants with a more or less attention-demanding concurrent task. For example, participants were asked to either solve or read arithmetic operations. Because solving operations needs more attention than simply reading them, attention should be less available for refreshing in the former than in the latter condition. As predicted by the authors, the manipulation of one mechanism while the other was impeded led to reduced recall performance, which strengthens the idea that two distinct mechanisms are involved in adults' verbal maintenance. Moreover, when the availability of both mechanisms was orthogonally manipulated, results showed an additive effect of the experimental manipulations on recall performance, which sustains the independence of the two mechanisms. To summarize, two maintenance mechanisms are involved in the maintenance of verbal information in adults' working memory (see Camos & Barrouillet, 2014, for review). They are distinct and independent processes, and because of this independence, they can be jointly used to maintain verbal information. Moreover, adults can chose to favor the use of one or the other process, for example under specific instructions or depending on some task characteristics (Camos et al., 2011). Finally, each mechanism is sensitive to different constraints. On the one hand, because attentional refreshing is more attentional-demanding than articulatory rehearsal, the former is highly sensitive to the availability of attention and its variation. On the other hand, because articulatory rehearsal relies on processes involved in language production, it is impeded by any concurrent articulation.

Contrary to the extensive exploration in adults, the joint implication of rehearsal and refreshing in verbal working memory has not yet been examined in children. Nevertheless,

several studies were dedicated to the development of each maintenance mechanism. Considerable evidence has suggested that children start using rehearsal from age 7 onwards. At 7 years old, the emergence of lip movements and of significant correlation between speech rate and memory span indicate the use of subvocal rehearsal (e.g., Flavell, Beach, & Chinsky, 1966; Gathercole & Adams, 1993; Gathercole et al., 1994). Moreover, recall performance is sensitive to the phonological similarity of visually presented memoranda in children older than 7, whereas visual similarity affects recall in younger children (e.g., Gathercole et al., 1994; Hitch et al., 1991). However, recent findings have questioned this qualitative change showing that children younger than 7 could use rehearsal (Al-Namlah et al., 2006; Henry et al., 2012; Jarrold & Tam, 2011; Tam et al., 2010). Because children younger and older than 7 were involved in the present study, this allowed a further examination of this question, i.e., if such a qualitative change appears or not at 7.

Concerning attentional refreshing, fewer studies have examined it in children (Barrouillet et al., 2009; Camos & Barrouillet, 2011; Gaillard, Barrouillet, Jarrold, & Camos, 2011). Recent research has shown that the use of refreshing also begins at around 7 years of age and increases until 14 years, reaching then a similar level of use and efficiency as in adulthood (Barrouillet et al., 2009). In a complex span task in which children read series of digits while maintaining letters, these authors showed that the beneficial effect on recall of having few digits to read in a fixed interval was stronger in older children. Thus, older children take more advantage of the increasing availability of attention when fewer digits have to be read. This improvement in refreshing efficiency is a major determinant of the developmental increase in working memory capacity observed in childhood (Gaillard et al., 2011). Conversely, recall performance does not depend on the attentional demand of the concurrent task in children younger than 7, but on the duration of the concurrent task, i.e., the retention interval (Camos & Barrouillet, 2011). This suggests that children younger than 7 do not use an attention-based mechanism of maintenance.

Despite the fact that both refreshing and rehearsal may emerge at similar age, only three studies have examined the joint implication of these two maintenance mechanisms in children's working memory (Magimairaj & Montgomery, 2012; Mora & Camos, 2015; Tam et al., 2010). Magimairaj and Montgomery (2012) showed that two factors, verbal storage and general attentional control, contributed to independent and unique variance in 7- to 11-year-old children's verbal working memory. This suggests that domain-general attention and verbal

storage mechanisms independently constrain children's verbal working memory. However, these authors did not investigate the age-related evolution of these mechanisms. Mora and Camos (2015) also did not examine developmental changes, as they studied only 8-year-old children. Nevertheless, they observed that these children could use these two maintenance mechanisms, and that impeding one of the two reduced recall performance in complex span task. Moreover, the experimental manipulation of the availability of the two mechanisms did not interact, as previously observed in adults. This suggests that the two maintenance mechanisms are independent in 8-year-old children as they are in adults. Finally, only one study examined the age-related changes in rehearsal and refreshing comparing 6- and 8-year-old children (Tam et al., 2010). In two experiments primarily using mostly Brown-Peterson paradigm, Tam et al. (2010) varied the opportunities for memory maintenance by manipulating the type of tasks introduced between the presentation of the memoranda and their recall. The concurrent task was either a verbal task, which impeded rehearsal, or a non-verbal task to hinder refreshing but to allow rehearsal. In addition, the memoranda were either phonologically similar or dissimilar words. When compared to an unfilled delay condition, introducing a non-verbal task similarly reduced 6- and 8-year-old children's recall. Based on this finding and contrary to Barrouillet et al. (2009; Camos & Barrouillet, 2011), the authors proposed little development in the use of refreshing between these two ages. Moreover, both types of concurrent task reduced recall, the verbal task resulting in a greater reduction than the non-verbal task. The detrimental effect of the verbal task was stronger in 8- than in 6-year-old children. Contradicting previous studies on the emergence of rehearsal, the authors suggested that young children aged 6 use rehearsal, although to a lesser extent than the 8-year-old children. In line with this suggestion, the phonological similarity effect, which is often conceived as an index of the use of rehearsal, affected recall in both 6- and 8-year-old children, and the effect disappeared under verbal concurrent task. Finally, the authors suggested that the stronger effect of the verbal concurrent task suggests that such a task impairs both rehearsal and refreshing, whereas the non-verbal task only impeded the use of refreshing.

Given that only one study thus far has examined the age-related changes of the two mechanisms in children's working memory, the aim of the present study was to extend this examination. Consequently, in line with Tam et al. (2010), we contrasted different age groups around the age of 7 to investigate the developmental changes in the use of these two

mechanisms in children's verbal working memory. Our two experiments included 6-year-old and 7-year-old children, as well as another group of older children (9- and 8-year olds in Experiments 1 and 2, respectively) for whom there is no doubt that they can use rehearsal and refreshing. As in Mora and Camos (2015), the experiments employed a fully crossed design by orthogonally manipulating the opportunity to use articulatory rehearsal and attentional refreshing within the same complex span task. Contrary to Tam et al.'s (2010) procedure, this design allowed the assessment of the distinct effect of each mechanism and to examine the potential interactions between the two mechanisms. Thus, in the two experiments, children performed four different complex span tasks that differed in the availability of rehearsal and refreshing. In the first experiment, we varied the concurrent attentional demand: the low-demanding task was a color-discrimination task in which children had to judge if the presented pictures were in black-and-white or in color, and the high-demanding task was a categorization task, in which children judged if the pictures represented an animal or not. In the second experiment, we induced a stronger manipulation of attentional demand as in Tam et al. (2010) who compared a condition with a concurrent task to a condition without any concurrent task (i.e., an unfilled delay condition). However, the two conditions in Tam et al. (2010) did not only differ on the existence of a concurrent attentional demand during the maintenance, but on other aspects. For example, the introduction of a concurrent task requires the maintenance of an additional task-set, and the programming and performance of motor responses. As a consequence, the reduction in recall performance observed by Tam et al. (2010) may be due to the difference in these other aspects and not in refreshing *per se*. Barrouillet et al. (2009; Exp. 3) executed a similar comparison between filled and unfilled conditions with the same criticism. Thus, Experiment 2 compared two conditions that both involved a concurrent task, but this concurrent task was attentionally-demanding only in one of the two conditions. In the other low-demand condition, the concurrent task did not induce a concurrent attentional demand, and thus it should not affect recall although it required maintaining its own task-set and performing motor responses. Barrouillet et al. (2007) have shown that the serial reaction time task is such a task. In a complex span task, these authors observed that increasing the number of stimuli for which participants had to press a key did not affect recall performance. The serial reaction time task has also the advantage of being simple to explain and perform by young children. Thus, Experiment 2 contrasted the serial reaction time task to the color-discrimination task used in the first experiment. In both

experiments, children had to perform the concurrent task either silently by pressing keys or aloud by pressing key while saying the response aloud. To induce a concurrent task, Mora and Camos (2015) asked children to perform a supplementary articulation in addition to the concurrent task (i.e., repeating “oui” at the pace of beeps). We changed this because it was already difficult for 8-year-old children, and the present study involved younger children. The great advantage of this design was that children were presented with the same memoranda and the same distracting pictures, and variation in the availability of refreshing or rehearsal only relied on changes in the instructions. Consequently, the risk that differences in performance across conditions arise from interference between memoranda and distractors was minimized.

It was predicted that increasing the attentional demand of the concurrent task should reduce the availability of attention, and thus the use of refreshing, thereby leading to reduced recall performance. Because refreshing emerges at 7, this should occur in older children and not in 6-year-old children. However, Tam et al. (2010) suggested that even 6-year-old children use refreshing, which does not further develop between 6 and 8. Given the aforementioned possibility that the difference observed by Tam et al. (2010) could rely on other factors, the current study introduced a better control condition in order to clarify this issue and shed light on the controversy about the development of refreshing between 6 and 8. Similarly, the introduction of a concurrent articulation should reduce recall by impeding rehearsal. A debate recently rose about the existence of a qualitative change in the use of rehearsal. According to the idea that the use of rehearsal appears at 7, the concurrent articulation should reduce recall in children aged 7 and older. Alternatively, such an effect could be observed in younger children, providing support to the more recent studies which question the qualitative change hypothesis (Al-Namlah et al., 2006; Henry et al., 2012; Jarrold & Tam, 2011; Tam et al., 2010). Finally, the present design would allow for examining the potential interaction between refreshing and rehearsal across three age groups. The only study that examined this question in children reported a lack of interaction in 8-year-old children (Mora & Camos, 2015). The present study extends this examination to a larger age range, searching for some age-related changes in the utilization of refreshing and rehearsal.

II.1. EXPERIMENT 1

The first experiment used a similar complex span task as in Mora and Camos (2015) but with some changes. Contrary to Tam et al. (2010) and Mora and Camos (2015) in which the memoranda were words, consonants were used as memoranda to reduce any impact of long-term memory knowledge, which could differ between younger and older children. Preliminarily, it was verified that all participants knew (i.e., recognized and named) the consonants. Each letter was followed by two pictures, and according to the experimental condition, the availability of articulatory rehearsal and of attentional refreshing was reduced by introducing a concurrent articulation and by increasing the concurrent attentional demand, respectively. To vary the concurrent attentional demand, two different tasks were performed on the pictures, either a color-discrimination or a categorization tasks. For the color-discrimination task, children had to determine if the pictures were in black-and-white or in color. For the categorization task, they had to determine if the pictures represented an animal or not. The categorization task should induce a stronger attentional demand than the color-discrimination task, thereby reducing the relative opportunity for attentional refreshing and yielding poorer recall than the color-discrimination task. According to Camos and Barrouillet's (2011), this negative effect of increased attentional demand should be observed in children older than 7 who could use attentional refreshing, and not in younger children. Alternatively, if younger children use refreshing as proposed by Tam et al. (2010), such a reduction of recall should appear at each age. Moreover, to induce a concurrent articulation, half of the children had to say their responses aloud while pressing keys to respond. The introduction of a concurrent articulation should impede the use of articulatory rehearsal, and should therefore result in reduced recall performance in children old enough to use this mechanism. Although rehearsal is thought to emerge at 7, recent evidence has suggested that younger children (aged 6) could already use rehearsal. Experiment 1 involved children aged between 6 and 9, therefore allowing an assessment of the age at which a concurrent articulation impedes recall of verbal information.

II.1.1. METHOD

Participants

One-hundred-and-eighty children from primary schools participated in the experiment: 65 kindergarteners (33 boys, mean age = 6 years 5 months, $SD = 5$ months), 59 first graders (21 boys, mean age = 7 years 5 months, $SD = 5$ months), and 56 third graders (32 boys, mean age = 9 years 7 months, $SD = 7$ months). There were all French native speakers, and none of children had difficulties with perceiving colors. Children's caretakers provided written informed consent.

Materials

Two lists of 18 series of one to six consonants were created, with three series of each length. All consonants in the alphabet were used, except W because it is trisyllabic in French, and they occurred equally in the lists. Series of acronyms, repetitions, and alphabetic-ordered strings were avoided. Pictures of animals and non-animals (e.g., door, book, hand) were selected from Snodgrass and Vanderwart (1980). For each category, 35 pictures with the most frequent name were used based on two measures of objective word frequency (i.e., in Brulex and Frantext ; New, Pallier, Ferrand, & Matos, 2001). It was also verified that the names were acquired before 74.5 months (Chalard, Bonin, Meot, Boyer, & Fayol, 2003). Pictures were presented in two versions: in black-and-white and in color. In each length of the complex span task, the same proportion of black-and-white and color pictures, as well as of animals and non-animals, were presented.

Procedure

Children were tested individually in a quiet room. Each child performed two complex span tasks differing on the type of concurrent task (categorization or color-discrimination) but with the same type of responses (key press alone or with aloud response). A different list of consonant series was associated to each complex span task, the association between lists and complex span task being counterbalanced across participants. In a trial, children were asked to remember the consonants and to perform a concurrent task on pictures (Figure II-1).

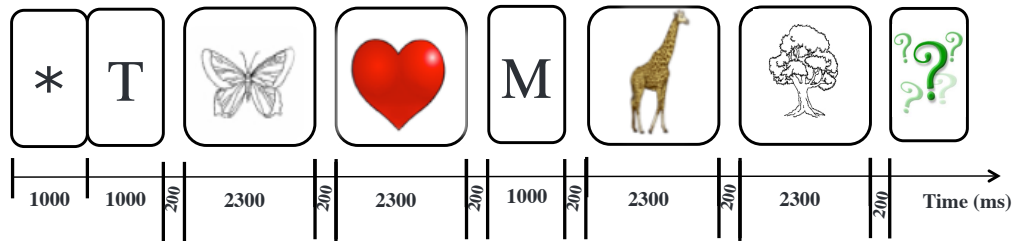


Figure II-1 : Illustration of a length-2 trial in the complex span task used in Experiment 1.

Each trial began by a first screen indicating the number of letters to be remembered (e.g. “2 letters”), which was read by the experimenter. Then, an asterisk appeared centered on screen during 1000 ms, followed by a letter for 1000 ms. After a delay of 200 ms, two pictures were presented in an invisible 10 x 10 cm square in the center of the screen for 2300 ms each with a 200-ms interstimulus interval (ISI). Then, the second letter appeared and so on until the end of trial when a question mark appeared. This question mark prompted the aloud recall of the letters in their order of presentation. Before each complex span task, a training phase included one trial with 1 letter to be remembered and no concurrent task, one trial with 2 pictures and no letter to maintain, and then 2 complex span task trials for length 1 and for length 2.

Two different tasks were performed on pictures either a color-discrimination or a categorization tasks. For the color-discrimination task, children had to determine if the pictures were either in black-and-white or in color by pressing a right or left key on the keyboard, respectively. To help children, black-and-white and colored stickers were stuck on corresponding keys. For the categorization task, they had to determine if the pictures represented an animal or not by pressing a left or right key, respectively. To help children, stickers with a cat or with a crossed-out cat were stuck below the corresponding keys. Response times and percentages of correct responses were recorded during these two concurrent tasks.

Half of the children started with 18 trials involving the color-discrimination task, and then the 18 trials with the categorization task; the other half did the reverse order. Moreover, to induce a concurrent articulation, half of the children in each age group had to say aloud their response (“color” and “no-color” in the color-discrimination task, and “animal” and “no-animal” in the categorization task) while pressing keys to respond.

The aloud recall of the consonants was written down by the experimenter, who systematically asked children the position of each recalled item afterwards in case of omissions. The task was terminated when the child failed all trials of the same length, or when all trials had been presented. Each correctly recalled series counted as one third; the total number of thirds was added up to provide a span score (cf. Barrouillet et al., 2004). For example, the correct recall of all the series of one, two, and three letters, of two series of four letters and one series of five letters resulted in a span of $(3+3+3+2+1) \times 1/3 = 4$

II.1.2. RESULTS

Data from 15 children were discarded: 9 kindergarteners, 5 first graders and 1 third grader had less than 50% of correct responses in the concurrent task. The remaining 56 kindergarteners, 54 first graders and 55 third graders had a mean rate of correct responses of 86% ($SD = 11$).

An analysis of variance (ANOVA) was performed on the percentage of correct responses in the concurrent task with age (6, 7 and 9 years), type of responses (keyed vs. aloud), and concurrent task (categorization vs. color-discrimination), with age and responses as between-subject factors and concurrent task as within-subject factor. Although percentage of correct responses was already high at 6 (82%, $SD = 11$), it was significantly greater in older children, with 86% ($SD = 8$) at 7 and 92% ($SD = 6$) at 9, $F(2, 159) = 23.88$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .23$; all differences between two age groups being significant, $ps < .05$. A difference emerged according to the type of responses, with higher accuracy when children produced an aloud response with the key-press (89%, $SD = 8$) than when only pressing keys (84%, $SD = 10$), $F(1, 159) = 14.56$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .08$. As expected, the categorization task ($M = 85\%$, $SD = 10$) induced a lower percentage of correct responses than the color-discrimination task ($M = 87\%$, $SD = 9$), $F(1, 159) = 9.40$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .06$. No interaction was significant, $F_s < 1$.

A similar ANOVA was performed on the response times for correct responses in the concurrent task. As observed for accuracy, older children outperformed the younger. Nine-year-old children (1251 ms, $SD = 177$) were faster than 7-year olds (1311 ms, $SD = 162$) and 6-year olds (1346 ms, $SD = 165$), $F(2, 159) = 5.45$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .06$. However, pairwise comparisons with Bonferroni adjustments indicated that the only significant difference

emerged between 6 and 9 ($p < .01$); the remaining differences were not significant ($ps > .13$). As expected, children were significantly slower in categorization (1349 ms, $SD = 172$) than in color-discrimination (1256 ms, $SD = 172$) tasks, $F(1, 159) = 67.32$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .30$. The type of responses did not affect the response times (aloud: 1305 ms, $SD = 173$ vs. keyed: 1300, $SD = 172$), $F < 1$. No interaction was significant, $ps > .10$.

These preliminary analyses showed that children in the three age groups did their best to perform the concurrent task, reaching a higher level of accuracy. Moreover, as expected, the categorization task led to poorer performance with a lower accuracy and longer response times than the color-discrimination task.

Finally, an ANOVA was performed on the mean spans with the same design as the previous ANOVAs. As often reported in literature, recall performance significantly increased with age, with 1.09 ($SD = .73$) at 6, 1.76 ($SD = 1.06$) at 7 and 2.82 ($SD = 1.35$) at 9, $F(2, 159) = 65.11$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .45$, with all differences between each age group being significant, $ps < .0001$ with Bonferroni correction (Figure II-2). The type of response also had a significant effect on recall, with poorer recall when response was aloud ($M = 1.34$, $SD = 0.91$) than silent ($M = 2.48$, $SD = 1.38$), $F(1, 159) = 78.53$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .33$. As we predicted, recall performance was more strongly reduced during the categorization task ($M = 1.81$, $SD = 1.28$) than the color-discrimination task ($M = 2.00$, $SD = 1.32$) concurrent tasks, $F(1, 159) = 10.16$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .06$. Moreover, as observed in adults, the type of responses and the type of concurrent task did not interact, $F(1, 159) = 1.20$, $p = .28$, $\eta_p^2 = .01$, $pBIC(H0|D) = .99$ ¹. Finally, whereas the type of response interacted with age (the difference between silent and aloud responses was 0.45 at 6, 1.28 at 7 and 1.63 at 9), $F(2, 159) = 8.00$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .09$, the manipulation of the concurrent task did not interact with age, $F < 1$, $pBIC(H0|D) = .99$. The 3-way interaction was not significant, $F < 1$, $pBIC(H0|D) = .99$.

¹ Because p-values do not provide evidence in favor of the null hypothesis, we computed the Bayesian Information Criteria (BIC) for the non-significant effects. A probability above .75 is conceived as positive evidence that the null hypothesis is true (Masson, 2011).

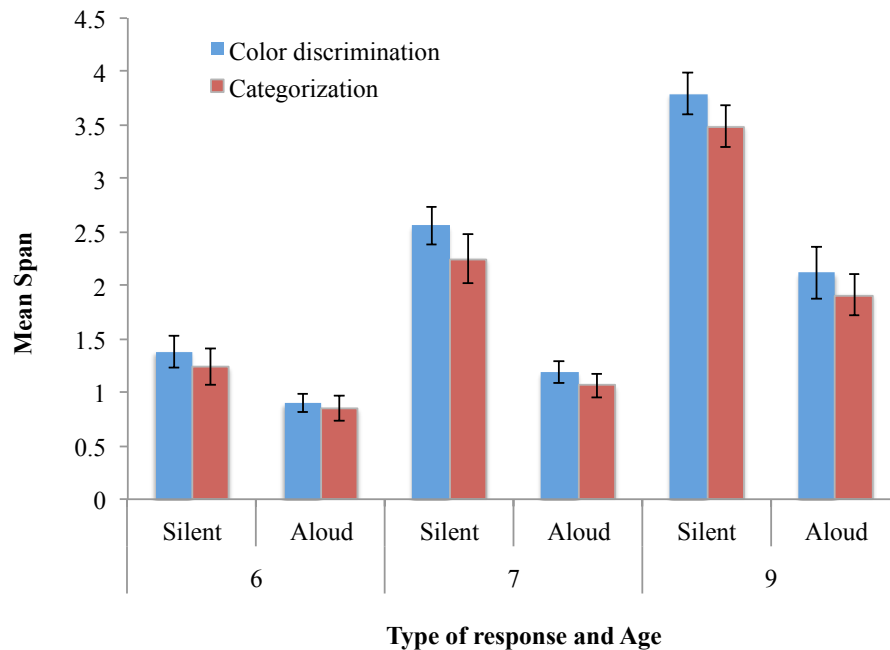


Figure II-2 : Mean spans according to the concurrent tasks (color-discrimination vs. categorization), the type of responses (keyed vs. oral) and the age. Error bars represented standard errors.

An ANOVA for each age group was performed to examine the age-related changes in the effects of the concurrent articulation and attentional demand in more detail. Consistent with previous studies (Henry et al., 2012; Tam et al., 2010), introducing a concurrent articulation reduced recall in all age groups, i.e., even in the youngest: $F(1, 54) = 6.80$, $p = .01$, $\eta_p^2 = .11$ at 6, $F(1, 52) = 37.63$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .42$ at 7, and $F(1, 53) = 37.08$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .41$ at 9. Conversely, increasing the concurrent attentional demand only reduced recall for the older children, $F(1, 52) = 4.76$, $p = .03$, $\eta_p^2 = .08$ at 7, and $F(1, 53) = 4.42$, $p = .04$, $\eta_p^2 = .08$ at 9, but not the younger children, $F(1, 54) = 1.29$, $p = .26$, $pBIC(H0|D) = .80$. Finally, the interaction between the two manipulations of rehearsal and refreshing was never significant for any of the three age groups, $F_s < 1$. The Bayesian analysis provided positive evidence in favor of the null hypothesis, $pBIC(H0|D) = .86$ at 6, $pBIC(H0|D) = .82$ at 7, and $pBIC(H0|D) = .87$ at 9.

II.1.3. DISCUSSION

Besides an expected increase of recall performance with age, this first experiment revealed three main findings. First, as expected, the concurrent articulation had a detrimental effect on recall. However, this effect appeared in the younger age group, revealing that 6-year-old children already use articulatory rehearsal to maintain verbal information in working memory. This finding supports recent studies, which reported a similar use of rehearsal in children younger than 7 (Al-Namlah et al., 2006; Henry et al., 2012; Jarrold & Tam, 2011; Tam et al., 2010), and questions the qualitative change conception, according to which the use of rehearsal emerges at 7. Nevertheless, the significant interaction between the type of responses and age observed in the present study, in agreement with the larger effect size in older than in 6-year-old children, suggests that rehearsal is more used by older children aged 7 and 9 than by the 6-year-old children. This result is congruent with the developmental change found by Tam et al. (2010) between 6 and 8. Indeed, these authors observed a larger phonological similarity effect in 8- than in 6-year-old children, revealing a stronger tendency to recode and maintain visually presented stimuli in a phonological form for older than for younger children. The second finding was that increasing the concurrent attentional demand reduced recall performance. Analyses of each age group revealed that such an effect appeared in children aged 7 and 9, but not in 6-year-old children. This result is congruent with previous studies, which showed that children younger than 7 were not sensitive to variation in concurrent attentional demand, and thus do not use refreshing (Barrouillet et al., 2009; Camos & Barrouillet, 2011). However, and mentioned in introduction, this interpretation was challenged by Tam et al. (2010), who showed that introducing an attention-demanding concurrent task reduced recall even in children younger than 7. Thus, to further examine this issue in the second experiment, the effect of the same color-discrimination task used in Experiment 1 was compared to the effect of a simple reaction time task, which does not rely on attentional resources (Barrouillet et al., 2007). Finally, the manipulation of the availability of refreshing and rehearsal never interacted. In each age group, we found evidence in favor of the null hypothesis. As already observed by Mora and Camos (2015) in 8-year-old children, this first experiment suggests that the two main mechanisms of maintenance in verbal working memory are independent from each other in children. Moreover, this does not appear to change between 6 and 9 years of age.

Experiment 2 reexamined the implication of refreshing and rehearsal in children's verbal working memory. Besides a stronger manipulation of the concurrent attentional demand, we introduced two further changes in Experiment 2. Because the use of visually presented consonants as memoranda in Experiment 1 cannot fully assure that these items were verbally encoded and maintained, memoranda in Experiment 2 were auditorily-presented words. The procedure was also changed because children found Experiment 1 very long and had difficulties remaining attentive until the end. Thus, instead of an increasing length procedure with a stop rule, children in Experiment 2 were presented with four series of word length in each condition. Accordingly, all children performed the same number of trials in each condition and regardless of their age.

II.2. EXPERIMENT 2

The aim of Experiment 2 was to reassess the same predictions as in Experiment 1. Although the same paradigm as in Experiment 1 was used, there were several changes. The most important was the introduction of a stronger contrast in attentional demand between the two concurrent tasks, wherein the color-discrimination task was compared to a simple reaction time task. In the latter task, children had to press a key or to say "animal" while pressing a key as fast as possible when an animal appeared on screen (all pictures depicted animals). Furthermore, although Experiment 1 used a stop rule, the children reported that the task was too long and led to have a different number of trials between conditions and across age. Thus, Experiment 2 presented the same number of trials to all children. To keep it suitable for the younger children, four trials of four words were presented in each condition. To avoid a ceiling effect in older children, the older group was younger (8 years) than in Experiment 1. Finally, the memoranda were words that were auditorily-presented to children through headphones to ensure verbal encoding of memoranda and also to avoid bias in encoding due to difference in reading proficiency.

II.2.1. METHOD

Participants

A total of 247 children from primary schools participated in the experiment: 86 kindergarteners (42 boys, mean age = 6 years 1 month, $SD = 7$ months), 87 first graders (34 boys, mean age = 7 years 3 months, $SD = 6$ months), and 74 second graders (42 boys, mean age = 8 years 2 months, $SD = 5$ months). There were all French native speakers, and none of children had difficulties with perceiving colors. None of them participated in Experiment 1. The children's caretakers provided written informed consent.

Materials and Procedure

The materials and procedure were similar to Experiment 1, with the following exceptions. Children were presented with four series of four words to be remembered in each complex span task. Each word was randomly selected from a set of 48 monosyllabic singular French nouns. These nouns were highly frequent words according to the French database Manulex-Inframanu 35 (Peereman, Lété, & Sprenger-Charolles, 2007) with an age of acquisition below 60 months. All series were recorded by a female voice and auditorily presented through headphones for 1000 ms. The two pictures following each word were the animal pictures used in Experiment 1 with two versions (black-and-white and color). Each picture was presented during 1800 ms with a 200-ms ISI. In each trial, the same proportion of color and black-and-white pictures appeared.

The color-discrimination task used in Experiment 1 was compared to a simple reaction time task. During the latter task, children had to press a key in the middle of keyboard (and to say "animal" in the aloud response condition) as soon as an animal appeared. A sticker with a cat was stuck on this key to help children. For training, children saw 8 pictures at the beginning of each complex span task to which they practiced the color-discrimination or simple reaction time task. If the percentage of correct responses was lower than 75%, they had to repeat this training one time. All participants performed two complex span tasks, starting either with the color-discrimination task or the simple reaction time task, and the order was counterbalanced across participants. As in Experiment 1, the concurrent articulation (aloud responses vs. silent keyed responses) was manipulated between-subjects.

To ensure that children assigned to the different experimental groups did not differ in their basic short-term memory capacity, all children performed, prior to any other tasks, a simple span task in which they had to memorize four lists of four words. Each word was presented during 1000 ms. Immediately after the presentation of the last word, children recalled the words out loud in the order of their presentation. Recall performance was scored as the percentage of words recalled in their correct position.

II.2.2. RESULTS

Data from 11 children were discarded: 7 kindergarteners and 4 first graders achieved less than 50% of correct responses on the concurrent task. The remaining 79 kindergarteners, 83 first graders and 74 second graders had a mean rate of correct responses of 90% ($SD = 10$).

An ANOVA was performed on the percentage of correct recall in the simple span task with age (6, 7 and 8 years) and type of response (keyed vs. aloud) as between-subject factors. Percentage of correct recall increased significantly with age, $F(2, 230) = 12.67$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .10$, with 60% at 6, 72% at 7 and 79% at 8. Pairwise comparisons with Bonferroni correction indicated that all differences were significant, $ps < .01$, except between 7 and 8, $p = .17$. No other effect was significant, $F_s < 1$. This ensured us that children assigned to the keyed and aloud response groups did not differ in their short-term memory capacity.

As in Experiment 1, we analyzed the concurrent task performance before analyzing recall performance. An ANOVA was performed on the percentage of correct responses with age (6, 7 and 8 years), type of response (keyed vs. aloud), and concurrent task (simple reaction time vs. color-discrimination), with age and type of response as between-subject factors, and concurrent task as within-subject factor. As in Experiment 1, the percentage of correct responses was already high at 6 (86%, $SD = 12$), and significantly increased with age, with 91% ($SD = 9$) at 7 and 93% ($SD = 8$) at 8, $F(2, 230) = 14.09$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .11$. Pairwise comparisons with Bonferroni adjustments indicated that all differences between age groups were significant, $ps < .001$, except between 7 and 8, $p = .31$. Children achieved a better percentage of correct responses when they responded aloud while pressing keys (92%, $SD = 10$) than when only pressing keys (88%, $SD = 9$), $F(1, 230) = 18.79$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .08$. As expected, the color-discrimination task (87%, $SD = 11$) induced a lower percentage of correct responses than the simple reaction time task (93%, $SD = 9$),

$F(1, 230) = 90.67, p < .0001, \eta_p^2 = .28$. The interaction between task and type of responses was significant, $F(1, 230) = 4.01, p < .05, \eta_p^2 = .02$, with a stronger difference between silent and aloud condition in color-discrimination task than simple reaction time task. No other interactions were significant, $ps > .35$.

A similar ANOVA was performed on response times for correct responses. Older children were faster to respond with 844 ms ($SD = 140$) at 8, 885 ms ($SD = 164$) at 7 and 945 ms ($SD = 161$) at 6, $F(2, 230) = 10.91, p < .0001, \eta_p^2 = .09$. Pairwise comparisons with Bonferroni adjustments indicated that all differences between age groups were significant, $ps < .02$, except between 7 and 8, $p = .16$. As expected, children were significantly slower during the color-discrimination (1067 ms, $SD = 153$) than the simple reaction time (717 ms, $SD = 168$) tasks, $F(1, 230) = 1168.11, p < .0001, \eta_p^2 = .84$. The type of responses did not affect response times, $F < 1$, but the interaction between task and type of responses was significant, $F(1, 230) = 8.81, p < .01, \eta_p^2 = .04$. Indeed, the difference between color-discrimination task and simple reaction time task was larger in aloud than in silent response conditions. No other interactions were significant, $ps > .17$. To summarize these analyses in concurrent tasks, children in each age group paid enough attention to the concurrent task and achieved a high level of performance. Moreover, the color-discrimination task led to lower accuracy and longer response times than the simple reaction time task.

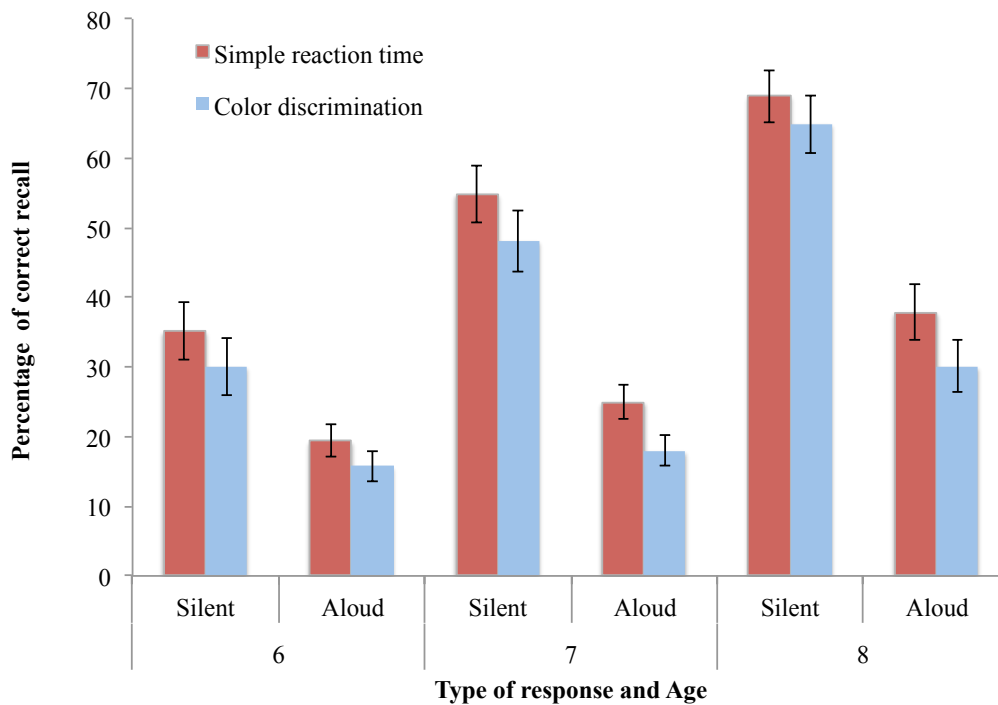


Figure II-3 : Percentage of correct recall according to the type of tasks (simple reaction time vs. color-discrimination), the type of responses (keyed vs. oral) and the age. Error bars represent standard errors.

Finally, an ANOVA was performed on the percentage of correct recall with the same design as the previous ANOVAs. As in Experiment 1, the three main effects were significant (Figure II-3). Recall performance significantly increased with age, with 25% ($SD = 21$) at 6, 37% ($SD = 27$) at 7 and 50% ($SD = 29$) at 8, $F(2, 230) = 29.17$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .20$; all differences between two age groups being significant, $ps < .01$ with Bonferroni correction. The type of response had a huge detrimental effect on recall with poorer recall when response was aloud (24%, $SD = 19$) than silent (50%, $SD = 29$), $F(1, 230) = 94.34$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .29$. Recall performance was also reduced when increasing the concurrent attentional demand, as the color-discrimination task (34%, $SD = 28$) yielded lower recall performance than simple reaction time task (40%, $SD = 28$), $F(1, 230) = 27.38$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .11$. Finally, only the interaction between the type of response and age was significant. Recall was more reduced under the aloud response as compared to the silent in 7- and 8-year-old children (a reduction of 31%) than in 6-year-old children (15%), $F(2, 230) = 4.26$, $p < .02$, $\eta_p^2 = .04$. The effect of the concurrent task did not interact with age, $F < 1$, $p_{BIC}(H0|D) = .99$, and the

interaction between type of response and concurrent task, as well as the 3-way interaction were not significant, $F_s < 1$, $p\text{BIC}(H_0|D) = .93$ and $p\text{BIC}(H_0|D) = .99$, respectively.

As in Experiment 1, we performed separate ANOVAs for each age group. Two findings were replicated. First, introducing a concurrent articulation reduced recall in the three age groups, $F(1, 77) = 12.50$, $p = .001$, $\eta_p^2 = .14$ at 6, $F(1, 81) = 42.49$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .34$ at 7, and $F(1, 72) = 42.71$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .37$ at 8. Second, the interaction between concurrent task and type of response was never significant, $F_s < 1$, and the Bayesian analyses provided evidence in favor of the null hypothesis in each age group, $p\text{BIC}(H_0|D) = .89$ at 6, $p\text{BIC}(H_0|D) = .90$ at 7, and $p\text{BIC}(H_0|D) = .86$ at 8. Finally, departing from Experiment 1, the effect of the concurrent task affected recall in the three age groups, even in the younger, $F(1, 77) = 7.82$, $p = .007$, $\eta_p^2 = .09$ at 6, $F(1, 81) = 13.91$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .15$ at 7, and $F(1, 72) = 6.92$, $p = .01$, $\eta_p^2 = .09$ at 8.

II.2.3. DISCUSSION

The aim of this second experiment was to further assess the impact of introducing a concurrent attentional demand on children's recall from working memory. Several changes were introduced from Experiment 1: the task used trials with a constant number of memoranda, and, more importantly, the memoranda were auditorily-presented words to ensure verbal encoding. Even with these changes, several findings previously observed in Experiment 1 were replicated.

First, it was confirmed that introducing a concurrent articulation impedes recall, even for the younger children aged 6. The fact that the same pattern was observed with auditory-presented words as with visually-presented consonants in Experiment 1 strengthened recent findings by other authors (Al-Namlah et al., 2006; Henry et al., 2012; Jarrold & Tam, 2011; Tam et al., 2010). Thus, the results disconfirmed the idea that only children after 7 can use rehearsal; the implications for the qualitative change hypothesis will be addressed in the General Discussion. Second, introducing a concurrent attentional demand resulted in a reduction of recall performance. This finding replicated Tam et al.'s (2010) results with another paradigm and Barrouillet et al.'s (2009) with other memoranda and concurrent tasks. Thus, distracting attention by an attention-demanding concurrent task affected the maintenance of verbal information in children. It remains to be understood why this effect

appeared even in the younger children who were not sensitive to variation of concurrent attentional demand in Experiment 1. Finally, although manipulating the availability of rehearsal and of attention affected recall performance in the three age groups involved in Experiment 2, no interaction between these factors emerged. Confirming Experiment 1, the present results sustained the idea that attentional and verbal systems have independent role in the maintenance of verbal information in children. We discussed in turn these three main findings in the General Discussion.

II.3. GENERAL DISCUSSION

The aim of the present study was to examine the contribution of articulatory rehearsal and attentional refreshing in children's verbal working memory. Contrasting with the large amount of studies exploring the implication of these mechanisms in adults, only two studies investigated it in children (Mora & Camos, 2015; Tam et al., 2010). While Tam et al. (2010) compared in 6- and 8-year-old children a verbal concurrent task, which impedes refreshing and rehearsal to a non-verbal task that permits rehearsal, Mora and Camos (2015) used a fully crossed design to vary the availability of the two maintenance mechanisms but in 8-year-old children only. Thus, the present study completed these previous studies by manipulating rehearsal and refreshing in a fully crossed design in children aged 6 to 8-9. This age range was chosen because the use of rehearsal and refreshing are conceived to emerge at around 7. Thus, this study also allowed examining changes in the use of these two maintenance mechanisms at a transitional age for working memory development. Below, we discussed the implication of the present results (1) for the development of rehearsal use and specifically for the qualitative change hypothesis, (2) for the role of attention in verbal working memory, and (3) for the interactions between the two main maintenance mechanisms described in verbal working memory, and their potential age-related changes.

As previously mentioned, the introduction of a concurrent articulation in the two reported experiments led to a reduction of recall performance whatever the age of our participants. In line with Baddeley's (1986) model of working memory, we introduced a concurrent articulation to impede articulatory rehearsal because they use similar language production processes. It should be noted that accuracy was higher when children gave aloud responses to the concurrent tasks than only pressing keys. Thus, the reduced recall

performance under aloud responses could not result from a higher attentional demand of this type of response, which induced a dual response, i.e., speaking out the responses while pressing keys. It should also be noted that, contrary to Tam et al. (2010) in which verbal concurrent task could impede both rehearsal and refreshing, our design allowed a clear distinction between the effects of impediment one or the other mechanism, and thus provided a cleaner assessment of the impact of a concurrent articulation on children's recall performance. Although we used different memoranda that could elicit a more or less verbal encoding of information (i.e., visually-presented consonants in Experiment 1, or auditory-presented words in Experiment 2), even the younger children aged 6 recalled less information when they performed a concurrent articulation. This finding is congruent with recent studies showing that children younger than 7 could use rehearsal (e.g., Henry et al., 2012; Tam et al., 2010). These studies question the existence of a qualitative change in maintenance mechanisms. This conception suggests that children before 7 use a visual encoding and maintenance of information while children after 7 favor a verbal processing of memoranda (e.g., Gathercole et al., 1994). In the present study, introducing a concurrent articulation by asking children to respond aloud reduced recall performance at any age. However, this reduction was smaller in 6-year-old children than in older children. This shows that even if children use rehearsal younger than expected from the qualitative change conception, its use clearly increases after 7. Tam et al. (2010) also provided evidence of rehearsal in 6-year-old children, with a stronger use in 8-year-old children. Nevertheless, our findings as well as Tam et al. (2010) are not sufficient to fully discard the qualitative change conception, because it remains possible that this qualitative change exists but occurs earlier than previously observed in Gathercole et al. (1994) or Hitch et al. (1991). Another study brought stronger evidence against the qualitative change conception. By manipulating the phonological and visual similarities of to-be-remembered pictures in 4- to 8-year-old children, Henry et al. (2012) convincingly showed a dual visual and phonological coding in 4-year-old children prior to an exclusive phonological coding in older children since 5-6 of age. These results demonstrated the verbal mediation in the coding of information. However, a phonological coding does not necessarily imply that children use a phonological maintenance mechanism like articulatory rehearsal to maintain this information. A phonological coding could be used by children before they can actively rehearse. As a consequence, recall could be sensitive to phonological similarity in younger children due to the verbal coding of visually presented items, and could

suffer from a stronger phonological effect in older children because they use rehearsal, which increases the probability of phonological confusion. Further studies are thus needed to dissociate the impact of phonological coding and of articulatory rehearsal in children's working memory, especially in 4- to 6-year-old children.

Our second set of findings documented the role of attention in children's working memory. Varying the availability of attention by presenting different attention-demanding tasks affected recall performance in children older than 7. However, when contrasting a task that does not rely on attentional resources to an attentional-demanding task, recall performance diminished even in 6-year-old children. The first finding replicated Barrouillet et al.'s (2009) and Camos and Barrouillet's (2011) results, although the material to maintain (animal names presented auditory and pictorially) and the manipulation of attentional demand (achieved through variation in the number of stimuli to process in a fixed duration, or in the duration to process a fixed number of stimuli) differed from the present study. Our result thus confirmed that children older than 7 could use an attention-based mechanism to maintain verbal information in working memory, and, as a consequence, are sensitive to any reduction in the availability of attention for maintenance purpose. The second finding is akin to results by Barrouillet et al. (2009, Exp. 3) and Tam et al. (2010, Exp. 1) who compared an unfilled delay condition with a condition in which the same delay was filled by a distracting task. Despite their differences in paradigms (a complex span and a Brown-Peterson tasks) and concurrent tasks (color-naming, categorization, or location judgment task), the two studies led to similar findings. Whatever the age of participants, children had poorer recall when they had to perform a concurrent task in the delay of retention. However, as discussed in introduction, the difference in recall performance in both studies could rely on the fact that the introduction of a concurrent task induces the maintenance of an additional task-set and requires the production of responses that could lead to poorer performance without affecting maintenance *per se*. Thus, in the present study, children always performed a concurrent task but we compared an attention-demanding task to a simple reaction time task, a task known for not affecting recall performance. Despite the fact that children had to maintain some task instructions for the concurrent task and to perform the same amount of motor and verbal responses in the two conditions, we observed a reduction of recall when the task was attentional demanding. This reduction appeared in the three age groups. Thus, this finding strengthens Barrouillet et al.'s (2009) and Tam et al.'s (2010) results and discards alternative

account. How can we understand these two findings, which may seem contradictory for younger children? Two alternative proposals can be put forward. In line with Tam et al. (2010), a first interpretation could be that younger children, like older children, use refreshing. This proposal is supported by the absence of interaction between the effect of manipulating concurrent attentional demand and age in both experiments. However, younger children would use it to such a small extent or with a weak efficiency that only a strong contrast in the availability of attention, like in Experiment 2, would impact their recall performance. This interpretation thus implies a strong development between 6 and 8-9 in either the use or the efficiency of refreshing, as recall in older children is sensitive to smaller variation in concurrent attentional demand as in Experiment 1. This idea is similar to Barrouillet et al.'s (2009) proposal. These authors reported in children from 8 to 14 that recall performance is more and more sensitive to the availability of attention as children get older. From this finding, they concluded that refreshing is more used, or more efficient, with age, and, as a consequence, maintenance is more and more affected by any reduction in the availability of attention. The same developmental trend could be extended to children younger than 8. Alternatively, the facts that varying attentional demand and introducing an attention-demanding task differently affect recall in younger children could be diagnostic of the existence of two distinct processes. We would like to suggest that the former effect is related to the refreshing while the latter is due to the consolidation of memory traces. Consolidation is an attention-demanding process, which transfers perceptual memories into a more durable form of memory (Jolicoeur & Dell'Acqua, 1998; Stevanovski & Jolicoeur, 2007). It allows the creation of short-term memory representations, and takes place just after the presentation of the memoranda (Engle, Cantor, & Carullo, 1992; Friedman & Miyake, 2004; Jarrold, Tam, Baddeley, & Harvey, 2011; Vergauwe, Camos, & Barrouillet, 2014). Any activity that distracts attention after the presentation of the memoranda would thus impede the creation of the memory representations, and results in poorer recall performance. This effect could be independent of the use of refreshing to maintain these representations. Children who do not use refreshing would be impaired by the introduction of an attention-demanding task but not by the variation of this attentional demand, while children using refreshing would be affected by both the introduction of and the variation in concurrent attentional demand. Conversely, it was already shown in adults that more- and less-consolidated memory traces were sensitive to variations in attention (Barrouillet, Plancher, Guida, & Camos, 2013), which supports the idea

of independence between consolidation and refreshing. Further studies should aim at assessing the distinctive role of consolidation in children's working memory.

Finally, the present study was the first to examine through a fully crossed design the interactions between refreshing and rehearsal through different ages. In two experiments, we observed no interaction between the availability of language processes and attention, which did not interact with age in the age range studied here (i.e., from 6 to 9). Although their manipulation of the concurrent articulation was different, the present result replicated what Mora and Camos (2015) found in 8-year-old children who maintained words while performing a location judgment task. This suggests that two systems, a language-based system and an attentional system, have independent effect in the maintenance of verbal information in children, as it was evidenced in adults (cf. Camos & Barrouillet, 2014, for a review). Moreover, Tam et al. (2010) reported that a verbal concurrent task, which impedes the two systems, had a stronger detrimental effect on recall than a non-verbal task that blocks the attentional system only. This fact is perfectly congruent with the existence of two independent systems that could have joint effect on children's working memory.

To conclude, the present study provided several important findings on the development of maintenance mechanisms in verbal working memory. First, we showed that rehearsal is used in children younger than 7, which brought further evidence on the current debate against the existence of a qualitative change in rehearsal use. Second, we observed that increasing the attentional demand of a concurrent task results in reduced recall performance in older children only, while introducing a concurrent attentional demand affected recall for all children. We suggested that these effects could result either from a strong development in refreshing between 6 and 9, or from the distinct impact of consolidation and refreshing on memory traces. Third, manipulating the availability of language processes and attention had independent effect on working memory maintenance in 6- to 9-year-old children. While it was already observed in adults, the present study is the first to examine it in children across several age groups, and to report no age-related change.

Chapitre III : Evolution des stratégies de maintien de l'information verbales entre 6 et 8 ans

Developmental improvement of strategies to maintain verbal information in children.

ABSTRACT

In adults, two mechanisms have been highlighted to maintain verbal information in working memory: articulatory rehearsal and attentional refreshing. The first, described in Baddeley's model is already in use at 7 years of age (Tam et al., 2010). At that age, children also use attentional refreshing, a mechanism described in the time-based resource-sharing (TBRs) model (Barrouillet et al., 2009). The present study evaluated the interplay between these two mechanisms and its changes from the ages of 6 to 9 years using a Brown-Peterson paradigm. In the first experiment, children had to maintain digits with or without a delay between encoding and recall. This delay was unfilled or filled with a concurrent task to vary the use of attentional refreshing. This task was performed either silently or aloud, the latter impeding articulatory rehearsal. In the second experiment, the opportunity for refreshing was manipulated either by introducing a concurrent task or by varying its attentional demand. Moreover, subvocal rehearsal was impeded by asking children to repeat "oui" throughout the task. Recall performance increased with age, and decreased under concurrent articulation regardless age. The introduction of an unfilled delay increased recall performance for children above 7 but had no impact on children under 7-years-old. Varying the attentional demand therefore had no impact at 6 and impeded recall at 7. This study reinforced the hypothesis of the independence of both mechanisms and showed the use of strategy from 6 to maintain verbal information.

Working memory allows the maintenance of information (e.g., letters) in the short term while performing a concurrent processing. Past research in adults has shown that we use two principal maintenance mechanisms: articulatory rehearsal and attentional refreshing (Camos et al., 2009). The relationships between the two mechanisms in adults have been explored in several studies that revealed that these two mechanisms can be used together or separately, and they have an additive effect on recall performance (Camos et al., 2009; Camos et al., 2013; Camos et al., 2011; Hudjetz & Oberauer, 2007; Mora & Camos, 2013). In children, most studies investigated the crucial role of articulatory rehearsal (e.g., Gathercole & Adams, 1993; Tam et al., 2010), whereas attentional refreshing has been less investigated (Barrouillet et al., 2009; Camos & Barrouillet, 2011). The aim of this study was to investigate the impact of time decay of memoranda between encoding and recall, and the relationships between this time decay and the use of rehearsal in children. To investigate the impact of time decay, a delay or a concurrent task was introduced between encoding and recall.

In adults, neurological and behavioral studies have investigated these two mechanisms and their relationships. Both domains have highlighted a distinction between articulatory suppression and attentional refreshing. Using a reading span task, Hudjetz and Oberauer (2007) manipulated the impediment of articulatory rehearsal. The participants had to read four segments of three words forming a sentence appearing successively on screen while also trying to maintain the last word of each sentence. Presentation of each segment was presented on screen at a slow (1890 ms) or a fast (1323 ms) pace. Participants had to read words at their own pace or continuously (following the rhythm given by beeps). The authors suggested that articulatory rehearsal should be impeded during the continuous reading condition compared to the own-pace reading condition. Consequently, the pace effect should disappear in the continuous reading condition if only articulatory rehearsal is used. Contrary to these predictions, the authors found effects of pace and reading condition, but no interaction between these two factors. The pace effect observed during the continuous reading condition suggested that another mechanism permits the maintenance of verbal information in addition to articulatory rehearsal, and thus at least two mechanisms are involved in the maintenance of verbal information in working memory.

Following this experiment, Camos et al. (2009) showed that these two maintenance mechanisms can operate both independently and jointly. In four different experiments using complex span tasks, the authors manipulated the opportunity of using these two mechanisms.

In the first experiment, the use of articulatory rehearsal was held constant while the use of attentional refreshing was manipulated by requiring participants to solve arithmetic operations or read them aloud. Solving arithmetic problems requires more attention than simply reading, and consequently attention should be less available for refreshing. In the second experiment, the use of attentional refreshing was held constant while the use of articulatory rehearsal was manipulated by requiring participants perform a parity judgement task either silently by pressing keys or aloud by saying “odd” or “even”. As expected, recall performance was reduced under articulatory suppression and also when attentional refreshing was impeded. Moreover, recall performance was reduced when the concurrent task was high-demanding compared to low-demanding. In the two last experiments, the authors manipulated the use of both mechanisms in an orthogonal design. In these two experiments, participants had to perform a low- or a high-demanding task either silently or aloud. Replicating the results of the two first experiments, the two last experiments of Camos et al. (2009) study reinforced the independence hypothesis and showed an additive effect on recall performance, with better recall when the low-demanding task was performed silently. This study is in line with the time-based resource sharing (TBRS) model describing two distinct loops involved in the maintenance of verbal information. The executive loop allows the maintenance of multimodal representations, and thus any type of information could be maintained by this system. The phonological loop is a specific system dedicated to verbal information that is maintained under phonological code.

Other studies have shown that adults could choose between these two mechanisms (Camos et al., 2011). The choice depends on task instructions but also on the attentional demand of the concurrent task. In three experiments using a complex span paradigm, participants had to maintain lists of phonologically similar (e.g., cat, man, tap) or dissimilar (e.g., cat, log, tent) items (Camos et al., 2011). Because memoranda are maintained in phonological form when using articulatory rehearsal, this manipulation should result in a phonological similarity effect (i.e., a better recall for phonologically dissimilar words lists than similar word lists) only when participants use articulatory rehearsal. At the same time, the authors manipulated the attentional demand of the concurrent task, such that participants had to perform a low-demanding task (i.e., a simple reaction time task) or a high-demanding task (i.e., a choice reaction time task). Participants were instructed to maintain items by rehearsing them in the second experiment, whereas participants in the third experiment were instructed to maintain verbal information via attentional refreshing, i.e. by thinking of the

items. Results showed a phonological similarity effect when the concurrent task was high-demanding and not when the participants had to perform a low-demanding task. This effect showed that participants favour attentional refreshing to reduce confusability of phonologically similar items, and favour articulatory rehearsal when less attention is available. In the same way, when participants were instructed to use articulatory rehearsal, the phonological similarity effect appeared regardless of the manipulation of attention available. On the contrary, phonological characteristics of items never affected recall when participants were instructed to maintain verbal information by using attentional refreshing.

All of these behavioural studies support the hypothesis of a dissociation between the two mechanisms corresponding to the two loops described in TBRS model: the executive loop and the phonological loop. Brain studies reinforce this distinction by showing two neural implementations of these two systems (for a review, Martin, 2005). Using functional magnetic resonance imaging (fMRI), Gruber and colleagues identified the neural correlates that underlie verbal working memory (Gruber, 2001; Gruber & von Cramon, 2001, 2003). In the first study, participants had to memorize letters followed by an unfilled or filled delay, with the filled delay further manipulated by inducing articulatory suppression or a double-task (Gruber, 2001). When articulatory suppression was relaxed, parietal and premotor areas, lateralized in the left hemisphere (including Broca's area), the intraparietal cortex and the right cerebellum were more activated than in the condition with articulatory suppression. On the contrary, except in the articulatory suppression condition, some activity was common to all conditions, with mainly bilateral activations in the prefrontal-parietal areas. More recently, Trapp et al. (2014) confirmed the distinction between two neural networks supporting the hypothesis of two distinct mechanisms and added that, during complex tasks, articulatory rehearsal would be increasingly supported by an attentional refreshing mechanism. Indeed, articulatory maintenance was supported by the non-articulatory maintenance system as set sizes (i.e., number of memoranda) increased. Non-articulatory maintenance network was additionally recruited in this highly demanding condition. This would explain why, when the two mechanisms are available, the performance to maintain verbal information is better. In summary, functional neuroimaging studies support the hypothesized dissociation of two complementary brain systems underlying verbal working memory. Though the relationships between articulatory rehearsal and attentional refreshing have been well studied in adults, these relationships have been less explored in children.

Most studies on the maintenance mechanisms of verbal information in children have investigated the development of each mechanism independently. To a considerable extent, these studies focus on the development of articulatory rehearsal (Baddeley, Gathercole, & Papagno, 1998; Gathercole & Baddeley, 1989). In particular, studies have shown the emergence of articulatory rehearsal at around 7 years of age (Gathercole & Adams, 1994; Jarrold, Hewes, & Baddeley, 2000). However, more recent studies have revealed the use of articulatory rehearsal before 7 (Tam et al., 2010). Lip movements and sensitivity to phonological similarity of visually presented stimuli indicate that younger children also use rehearsal (Gathercole et al., 1994; Henry et al., 2012; Jarrold & Tam, 2011; Tam et al., 2010). The other mechanism, attentional refreshing, has been less investigated. The few studies that have investigated the use of attentional refreshing in children have shown that it emerges also from around the age of 7 years. In three experiments, Barrouillet et al. (2009) investigated the use of attentional refreshing in 5- to 14-year-old children. In the first two experiments, 8- to 14-year-old children had to maintain letters while they performed a concurrent task wherein the cognitive load (e.g., the proportion of time during which concurrent task captures attention) was manipulated by varying the number of digits presented during fixed inter-letter intervals. Decreasing recall with the increased number of digits was greater in older children, displaying that younger children take less advantage of the increasing availability of attention when fewer digits have to be read. In another experiment, Barrouillet et al. (2009, Experiment 3) investigated this effect in 5- and 7-year-old children who had to maintain animal drawings while they performed a colour denomination task of zero, two or four colours intended to vary attentional demand. Whereas recall of 7 year olds decreased with increasing the number of colours to name, recall of 5 year olds only decreased when the concurrent task was introduced with no variation in performance according to the number of colours to name. Thus, 5-year-old children seem to maintain verbal information in some passive way, and the addition of a concurrent attentional demand leads to reduced recall regardless of the amount of this demand.

Camos et Barrouillet (2011) confirmed this hypothesis by manipulating the cognitive load and the raw duration of the concurrent task in 6- and 7-year-old children. Participants had to maintain animal names while they performed a colour-naming task. Children had to name one or two colours in 2 sec or two colours in 4 sec. Younger children were affected by the raw duration of the concurrent task (i.e., 2 vs. 4 sec) whereas older children were affected by its cognitive load (i.e., 2 colours in 2 sec vs. 1 colour in 2 sec or 2 colours in 4 sec). This

result confirmed Barrouillet et al.'s findings that the use of attentional refreshing begins around 7 years of age because they were sensitive to the manipulation of attentional demand in the concurrent task, whereas recall in 5-year-old children was only impeded by the raw duration. Bertrand and Camos (2015) reinforced this finding by showing a reduced recall in 4- to 6-year-old children when introducing an unfilled delay between presentation of items and their recall. However, recall was also reduced when increasing the demand of the concurrent task. Consequently children between these ages are not able to use attentional refreshing but were sensitive to variations of attentional demand. To conclude, the use of refreshing seems to begin around 7 and increases until 14 and younger children were sensitive to attention variation.

Only three studies have investigated the relationship between articulatory rehearsal and attentional refreshing in children (Magimairaj & Montgomery, 2012; Mora & Camos, 2015; Tam et al., 2010). Magimairaj and Montgomery (2012) used general linear modeling to determine common variance between different predictors. Results of this study showed that these two mechanisms contribute independent variance in children. However, the authors did not investigate the developmental evolution. Similarly, Mora and Camos (2015) investigated the relationship between these mechanisms only at 8, and showed that the impeding of one of the two mechanisms in complex span task leads to a decrease of recall performance. Moreover, in two experiments varying opportunities to use the maintenance mechanisms, Tam et al. (2010) examined the developmental improvement in working memory recall between 6- and 8-year-old children. In the first experiment, children had to maintain lists of 2 to 6 words in four types of trials: simple span, delayed span, Brown-Peterson, and complex span tasks. Recall directly followed the last word in the simple span trials, and a delay was added before recall in the delayed span trials. This period of delay varied with the list length and was determined by multiplying the number of memoranda by 3 sec. The Brown-Peterson trials were similar to the delay span trials, except that children performed a concurrent task during the delay period. Similarly, in the complex span task, participants were also asked to perform a concurrent task, but each item was followed by the concurrent task for 3 sec. The concurrent task in the Brown-Peterson and complex span trials required participants to determine whether the coins that successively appeared on screen were gold or silver. To respond, child pressed buttons on a keyboard. Half of the trials were composed of phonologically similar words and the other half of phonologically dissimilar words. In the second experiment, participants were required to maintain lists of pictures whose names were

either phonologically similar or dissimilar. Four trial types were also used: a simple span task, a delayed span task, and two Brown-Peterson tasks, one with a verbal concurrent task and the other with a non-verbal task. During the verbal concurrent task, children were asked to name the color of the circle that appeared in the center of the screen (red or green) out loud. For the non-verbal concurrent task, children had to press a button on the right or left of the screen depending on the location of the circle that appeared on the screen (left or right) regardless of the color of circle. Thus, the verbal concurrent task was intended to impede rehearsal and the non-verbal concurrent task was intended to impede the use of refreshing. Regardless of age, children exhibited a phonological similarity effect that disappeared only in the second experiment with a verbal concurrent task (i.e., under articulatory suppression). The results concerning the impact of the introduction of a delay between memoranda and recall were mixed. In the first experiment, recall performance was reduced after an unfilled delay compared to immediate recall from simple span. This reduction of recall was also previously observed by Barrouillet et al. (2009, Exp.3) in 5- and 7-year-old children. However, in the second experiment, no difference emerged between the simple span and the delayed span task and no interaction appeared between condition and age.

To conclude, previous experiments (e.g., Tam et al., 2010) have shown that children recode and maintain visually-presented information into phonological form. Moreover, the two types of concurrent tasks reduced recall, but Tam et al. (2010) showed that the verbal task induced a higher reduction of recall than the non-verbal task. This stronger reduction could have occurred because the verbal task impeded both mechanisms, rehearsal and refreshing, whereas the non-verbal task only impeded the use of attentional refreshing. Moreover, this experiment cannot explain by itself the findings concerning the introduction of an unfilled delay between the presentation of memoranda and their recall. As explained by Tam et al. (2010), the lack of decline when a delay was introduced in the second experiment could have been due to smaller sample, a between-subject design or differences between delay intervals (3 s and 2 s per storage item in the first and second experiment, respectively). Consequently, we kept the delay of the retention interval constant across list lengths in our study.

The present study

The aim of the present study was to investigate the developmental improvements in articulatory rehearsal and attentional refreshing. Accordingly, two experiments using the Brown-Peterson paradigm explored the developmental interaction of articulatory rehearsal

and attentional refreshing in children aged between 6 and 9 years old using an orthogonal design that manipulated their use in the same task. During both experiments, children had to maintain a series of one to six digits. In the first experiment, four groups of children ages 6, 7, 8 and 9 years old participated. To vary the opportunity of using attentional refreshing, we introduced either an unfilled delay or a delay filled by a concurrent task between encoding and recall. During this concurrent task the participants had to perform a localization judgement task on squares that were presented either on the upper or lower part of the screen. The use of articulatory rehearsal was manipulated by performing this task silently by pressing corresponding keys or aloud by saying their responses aloud in addition to pressing the keys. Saying the response aloud induced articulatory suppression that should impair rehearsal.

The second experiment varied the opportunity of using attentional refreshing by introducing either an unfilled delay or a filled delay with a low- or high-attentional demanding task between encoding and recall. During this filled delay, children aged between 6 and 8 had to determine whether the smiley that appeared on the screen was red or blue. To vary attentional demand of the concurrent task, cognitive load was manipulated by presenting 1 or 2 smileys within 4 sec. The use of articulatory rehearsal was manipulated as in the first experiment by adding an articulatory suppression or not. However, articulatory suppression was manipulated by varying concurrent articulation (i.e., repeating “oui” with each tone). We assumed that recall should decline when either one of the two mechanisms was impeded. This decline would be even more significant when the two mechanisms were impeded. However, 6-year-old children who do not use refreshing would be impeded by the introduction of a delay between encoding and recall and by the introduction of an attention-demanding task but not by the variation of its attentional demand. Conversely, children using refreshing would be affected by both the introduction of a concurrent task and the variation in concurrent attentional demand but not by introduction of an unfilled delay between encoding and recall.

III.1. EXPERIMENT 1

The first experiment used three different tasks in which children had to maintain digits: forward digit span, an unfilled delay span, and a filled delay span task. The forward digit span task from the WISC IV tested recall immediately following the presentation of the memoranda. The unfilled delay span had a delay between the presentation of the memoranda

and recall, during which children could presumably implement maintenance mechanisms. The filled delay span task was similar except that children had to perform a concurrent task during the delay by judging the location of squares presented on either the upper or lower part of the screen. Half of the participants performed this concurrent task silently by pressing keys, and the other half had to say their response aloud while pressing keys. The experiment utilized 6- to 9-year-old children to assess the evolution across age.

III.1.1. METHOD

Participants

A total of 280 children from two primary schools in Switzerland participated in the experiment: 73 kindergarteners (36 boys, mean age = 6 years 2 month, $SD = 6$ months), 66 first graders (31 boys, mean age = 7 years 4 months, $SD = 6$ months), 62 second graders (32 boys, mean age = 8 years 5 months, $SD = 7$ months), and 79 third graders (41 boys, mean age = 9 years 4 months, $SD = 6$ months). There were all French native speakers, and none of children had difficulties with perceiving colours. Permission for recruitment was gained from local authorities, as well as written informed consent from the children's carers.

Materials and Procedure

Children were tested individually in a quiet room. Before the start of the experiment, participant performed the forward digit span from the WISC IV. Then, each child performed two Brown-Peterson span tasks, one with an unfilled delay and the other with a filled delay with silent (key press alone) or aloud responses (see Figure III-1). The order of the Brown-Peterson tasks and the type of responses were counterbalanced across participants. Children were presented with increasing series of one to six digits to be remembered followed by a filled or an unfilled delay. During the filled delay, children had to judge the location of squares presented on either the upper or lower part of the screen. The two locations of the black square (side = 18 mm subtending 2° in visual angle) were 68 mm apart (6.5° in visual angle). For each type of task (filled an unfilled delay tasks), 3 trials were presented in each length (from 1 to 6 digits).

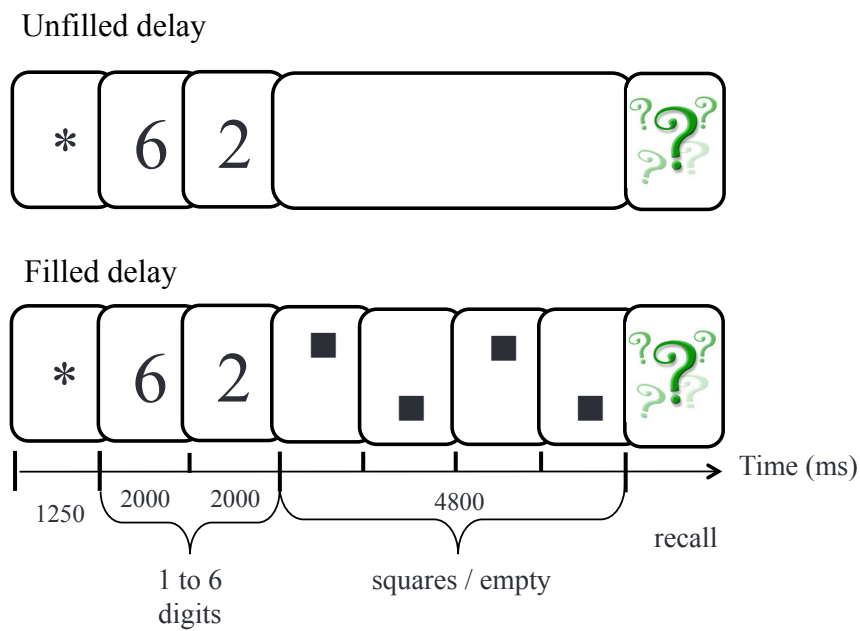


Figure III-1 : Illustration of two type of task used in Experiment 1.

Each trial started with an asterisk centred on screen during 750 ms followed by a 500-ms delay. Next, each digit was displayed for 1500 ms followed by a 500-ms delay. The processing activity followed all of the memoranda. During the filled delay, participants performed a location judgment task, wherein a series of four squares were successively presented and randomly in either the upper and lower locations with the same frequency. Each of the four squares was displayed during 1000 ms followed by a 200-ms delay. Children had to judge the location as quickly as possible by pressing either an up- or down- handed key for the upper and lower locations, respectively. Moreover, to induce an articulatory suppression, half of the sample had to say aloud their response while pressing keys to respond. Response time and percentages of correct responses were recorded during this concurrent task. During the unfilled delay task, participants were free to use maintenance mechanisms if they chose to do so. The delay interval, 4800 ms, was equivalent to the total duration of the processing task during the filled delay. A question mark appeared at the end of the trial to prompt children to recall the letters out loud in the same order as they were presented. At the beginning of each set, a training phase comprised a trial “length 1” (with one digit), and two trials “length 2” (with two digits). Before beginning the critical trials, participants practiced 30 trials of the processing task to be used during Brown-Peterson trials with the filled delay (i.e., the location judgment task). If the percentage of correct responses was lower than 80%, children had to repeat the training. During the critical trials, the set was

terminated either when the children failed at all trials of one length or when all of the trials had been presented. The experimenter recorded the recall. Each correctly recalled series counted as one third; the total number of thirds was added up to provide a span score (Barrouillet, Bernardin, & Camos, 2004). For example, the correct recall of all the series of one, two, and three letters, of two series of four letters and one series of five letters resulted in a span of $(3+3+3+2+1) \times 1/3 = 4$

III.1.2. RESULTS

Data from 4 children were discarded: 1 kindergartener, 1 first grader, 1 second grader and 1 third grader committed less than 50% of correct responses on the concurrent task. The remaining (72 kindergarteners, 65 first graders, 61 second grader and 78 third graders) had a mean rate of correct responses of 89% ($SD = 11$).

An analysis of variance (ANOVA) was performed on the percentage of correct responses on the location judgment task, with age (6, 7, 8 and 9 years) and type of responses (keyed vs. aloud) as between-subject factors. Although percentage of correct responses was already high at 6 (83%, $SD = 14$), it significantly increased with age with 88% ($SD = 11$) at 7, 92% ($SD = 7$) at 8 and 94% ($SD = 6$) at 9, $F(3, 268) = 17.47$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = 0.16$. Pairwise comparisons with Bonferroni adjustments indicated that all differences were significant, $ps < .02$, except between 7 and 8, $p = .35$ and between 8 and 9, $p = .82$. A difference emerged according to the type of responses, with better percentage of correct responses when children had to respond aloud (91%, $SD = 10$) than silently with keys (88%, $SD = 11$), $F(1, 268) = 5.93$, $p = .016$, $\eta_p^2 = .02$. The interaction between type of response and the age was not significant, $p = .34$.

A similar ANOVA was performed on response times for the location judgment task. As observed for accuracy, 9-year-old children (568 ms, $SD = 65$) were faster than 8-year olds (577 ms, $SD = 70$) faster than 7-year olds (607 ms, $SD = 93$) and faster than 6-year olds (635 ms, $SD = 105$), $F(3, 268) = 9.69$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .10$. However, pairwise comparisons with Bonferroni adjustments indicated that differences between 6 and 7, 7 and 8 and 8 and 9 were not significant, $p = .39$, $p = .24$ and $p = 1.00$, respectively. All other comparisons were significant $ps < .03$. A difference emerged according to the type of responses, with longer response times when children had to respond aloud (608 ms, $SD = 89$) than silently with keys (586 ms, $SD = 88$), $F(1, 268) = 5.16$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .02$. This effect interacted with age,

$F(3, 268) = 3.28, p < .03, \eta_p^2 = .04$. However, it was significant only at 7, $F(1, 64) = 11.42, p < .01, \eta_p^2 = .15$ and was not significant at 6, 8 and 9 years old, $ps > .10$. To summarize these analyses in the concurrent tasks, children in each age group paid enough attention to the concurrent task and achieved a high level of performance.

Finally, a mixed ANOVA was performed on the mean spans with age (6, 7, 8 and 9 years) and type of responses (keyed vs. aloud) as between-subjects factors, and task (simple span, unfilled delay and filled delay), as a within-subjects factor (see Figure III-2). The analysis revealed that recall increased with age, $F(3, 268) = 66.85, p < .0001, \eta_p^2 = .43$, such that 9-year-old children ($M = 3.72, SD = .87$) recalled more digits than 8-year olds ($M = 3.37, SD = .93$), who in turn recalled more than 7-year olds ($M = 2.76, SD = .99$) and 6-year-old children ($M = 2.39, SD = .95$). Pairwise comparisons with Bonferroni adjustments indicated that all differences between age groups were significant, $ps < .01$. Recall decreased significantly under the aloud condition ($M = 2.91, SD = 0.95$) compared to the silent condition ($M = 3.22, SD = 0.96$), $F(1, 268) = 18.41, p < .0001, \eta_p^2 = .06$. The main effect of task was significant, $F(2, 536) = 169.63, p < .0001, \eta_p^2 = .39$. Indeed, pairwise comparisons with Bonferroni adjustments indicated that recall was better in the unfilled-delay condition ($M = 3.52, SD = 1.01$) compared to immediate condition ($M = 3.10, SD = 0.81$) and to filled-delay condition ($M = 2.58, SD = 1.15$), $ps < .001$. The interaction between task and type of response was significant, $F(2, 536) = 68.92, p < .0001, \eta_p^2 = .21$. As expected, because the type of response was not manipulated between the simple and unfilled delay span trials, it had no impact on simple span and unfilled delay span trials ($F_s < 1$) whereas in filled delay span trials, recall decreased significantly in the aloud condition ($M = 2.07, SD = 1.11$) compared to the silent condition ($M = 3.08, SD = 2.58$), $F(1, 268) = 100.13, p < .0001, \eta_p^2 = .27$. The interaction between age and type of response, as well as the 3-way interaction, were not significant $F_s < 1$. The interaction between task and age was significant $F(6, 536) = 5.54, p < .0001, \eta_p^2 = .06$. To investigate this interaction, three further analyses compared simple span and filled and unfilled delay span trials.

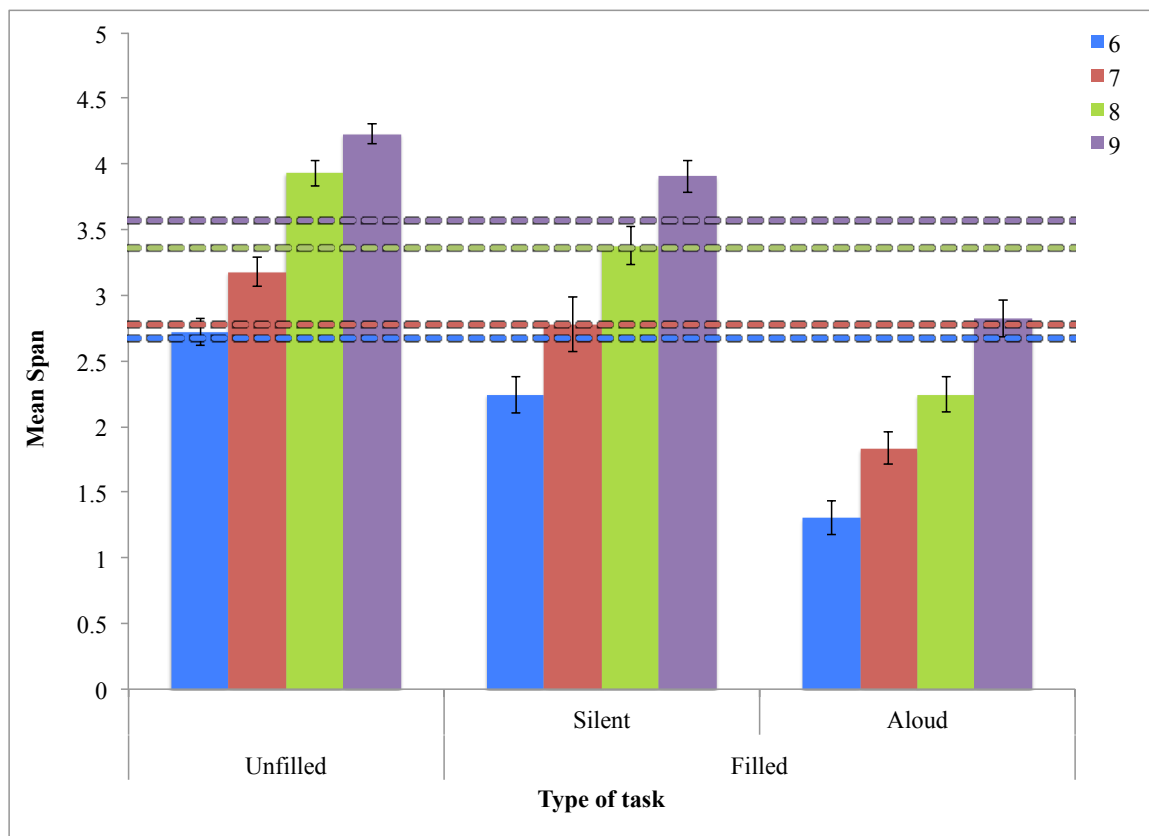


Figure III-2 : Mean spans according to the type of tasks (unfilled delay vs. filled delay), the type of responses (keyed vs. oral) and the age. Dotted lines represented simple span condition. Y bars represented standard errors.

Simple span versus unfilled delay span tasks

A mixed ANOVA with age (6, 7, 8 and 9 years), type of responses (keyed vs. aloud), and task (simple span vs. unfilled delay span) was performed on the mean spans. There was an increase of recall with age, $F(3, 268) = 52.94, p < .0001, \eta_p^2 = .37$, with 2.39 ($SD = .84$) at 6, 2.76 ($SD = .92$) at 7, 3.37 ($SD = .81$) at 8 and 3.72 ($SD = .79$) at 9. Pairwise comparisons with Bonferroni adjustments indicated that all differences between age group were significant, $ps < .001$ except between 8 and 9, $p = .14$ and this effect felt to be significant between 6 and 7, $p = .08$. Recall performance increased when an unfilled delay was introduced before recall, $F(1, 268) = 73.72, p < .0001, \eta_p^2 = .22$. This effect interacted with age, $F(3, 268) = 7.99, p < .0001, \eta_p^2 = .08$. A clear pattern shown in Figure III-2 emerged from this analysis. On one hand, 6- year-old children who were not affected by the introduction of a delayed between encoding and recall ($F < 1$) and on the other hand, 7- 8- and 9-year-old children who benefited from the introduction of this delay ($F(1, 63) = 11.39, p < .01, \eta_p^2 = .15$,

$F(1, 59) = 27.63$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .32$ and $F(1, 76) = 81.85$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .52$, respectively). Thus, the benefit of the delay increased with age (respectively a .40, .57 and .66 increase of recall between forward digit span and unfilled delay span task).

Unfilled delay versus filled delay span task in silent condition

A mixed ANOVA with age (6, 7, 8 and 9 years) and task (unfilled delay vs. filled delay) was performed on mean spans in silent condition. As expected, we observed an increase in recall with age, $F(3, 136) = 31.00$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .41$. Pairwise comparisons with Bonferroni adjustments indicated that all differences between age group were significant, $ps < .04$, except between 8 and 9 ($ps = .16$), with 2.47 ($SD = .81$) at 6, 2.98 ($SD = 1.02$) at 7, 3.63 ($SD = .83$) at 8 and 4.04 ($SD = .73$) at 9. Children were impeded by the introduction of a silent task during the delay, $F(1, 136) = 37.94$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .22$, with a better recall in unfilled delay condition ($M = 3.49$, $SD = 0.98$) than in filled delay condition ($M = 3.08$, $SD = 1.10$). No interaction appeared between type of task and the age, $F < 1$.

Filled delay span task

An ANOVA was performed on the mean spans with age (6, 7, 8 and 9 years) and type of responses (keyed vs. aloud) as between-subject factors. As expected, we observed an increase in recall with age, $F(3, 268) = 47.70$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .35$. Pairwise comparisons with Bonferroni adjustments indicated that all differences between age group were significant, $ps < .007$, with 1.79 ($SD = .94$) at 6, 2.31 ($SD = 1.08$) at 7, 2.82 ($SD = .95$) at 8 and 3.36 ($SD = .99$) at 9. Children were impeded by the introduction of a concurrent articulation during the task, $F(1, 268) = 100.13$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .27$, with a better recall in silent condition ($M = 3.08$, $SD = 1.11$) than in aloud condition ($M = 2.07$, $SD = 0.96$). No interaction appeared between type of recall and the age, $F < 1$.

III.1.3. DISCUSSION

This first experiment investigated the developmental improvement of articulatory rehearsal and attentional refreshing. To this end, the use of attentional refreshing was manipulated by introducing an unfilled delay or a concurrent task between encoding and

recall, whereas the use of articulatory rehearsal was manipulated by adding a concurrent articulation during the task or performing the task silently. The results showed that introducing a delay before recall improved recall in older children. Six-year-old children were not affected by the introduction of an unfilled delay between encoding and recall. This result is at odds with previous experiments (Tam et al., 2010) showing a reduction of recall during an unfilled delay condition regardless of age. However, this result suggests that 6 year-old children could use some maintenance mechanisms during this delay to avoid time decay and older children could take advantage of the delay to strengthen memory traces and increase their recall. This indicates a greater use of maintenance mechanisms for older than for younger children during an empty delay. However, the addition of a concurrent task impeded recall regardless of age. This effect could be explained by the fact that, like Tam et al (2010), manipulation of the use of attentional refreshing was induced by the introduction of an additional task-set that brings additional cost and not directly by the manipulation of available attention.

Thus, Experiment 2 was conducted to further investigate the introduction of a delay, the introduction of a concurrent task and the manipulation of attentional capture by this concurrent task within the same experiment. This first experiment already highlighted the use of maintenance mechanisms before the age of 7. This finding from Experiment 1 was examined further in Experiment 2 to determine the impact of the introduction of a delay and the impact of the introduction of a task with a low- or high- attentional demand.

III.2. EXPERIMENT 2

In the second experiment, we used the same tasks as in the first experiment, the simple span, delayed span and Brown-Peterson span tasks in which children had to maintain digits. Because recall of the 9-year-old children was similar to the 8-year-old children, and the goal of the study was to examine the crucial age of 7, so this experiment focused on 6-, 7- and 8-year-old children. To control for the potential additional cost of introducing a concurrent task during the delay between encoding and recall, the use of refreshing was manipulated by varying the attentional demand of the concurrent task (i.e., naming the color of successively presented smileys). Barrouillet et al. (2009) showed that recall performance depends on the cognitive load that the processing component involves. Accordingly, the attentional demand of this experiment's concurrent task was manipulated by varying the number of smileys (one

or two) within the same amount of time. Articulatory rehearsal was also manipulated by varying the concurrent articulation of the task, but the type of articulatory suppression differed from that of Experiment 1. Using the previous experiment's manipulation of concurrent articulation would mean that the condition with two smileys would induce twice as much concurrent articulation compared to the task with one smiley. Thus, Experiment 2 required half of the children had to say "oui" in response to a tone playing every 490 ms during the concurrent task in order to control for the amount of concurrent articulation between the two cognitive loads of the task (i.e., responding to one or two smileys).

III.2.1. METHOD

Participants

A total of 124 children from two primary schools in Switzerland participated in the experiment: 42 kindergarteners (19 boys, mean age = 6 years 3 months, $SD = 4$ months), 42 first-graders (24 boys, mean age = 7 years 4 months, $SD = 4$ months), and 40-second graders (21 boys, mean age = 8 years 3 months, $SD = 5$ months). They were all French native speakers, and none of children had difficulties with perceiving colors or had participated in Experiment 1. Permission for recruitment was gained from local authorities, as well as written informed consent from the children's carers.

Materials and Procedure

Experiment 2 modified the filled delay to manipulate the pace of presentation of items during the concurrent task. During the filled delay, children had to name the colors of smileys appearing successively on screen. For each smiley, the children had to judge the color as quickly as possible by pressing either "c" or "m" key for the red and blue color, respectively. The cognitive load was manipulated by presenting 1 or 2 smileys within a constant duration of 4 seconds. Blue or red smileys of 5-cm diameter were displayed on the center of the screen in randomly order. Each smiley was displayed for 2667 ms followed by a delay of 1333 ms in the 1 smiley condition and 1334 ms followed by a delay of 666 ms in the 2 smileys condition. In addition, there was a third condition in which the 4 s between encoding and recall was unfilled (see Figure III-3). Each child performed these three conditions in counterbalanced order, with 3 trials presented in each length (from 1 to 6 digits) per condition. Moreover, to

induce an articulatory suppression, half of the sample had to say aloud “oui” (yes) for each tone (“bip”) that they heard though their headphones during the filled delay. Each tone was presented for 10 ms after a delay of 490 ms, and so there were 8 tones played during the 4 sec delay. Before the filled delay trials, participants practiced the color discrimination task on 12 successively-presented smileys. Each smiley was displayed for 4 or 2 sec corresponding to the filled-delay condition with 1 or 2 smileys, respectively. As previous experiment, before the start of the experiment, participant performed the forward digit span from the WISC IV.

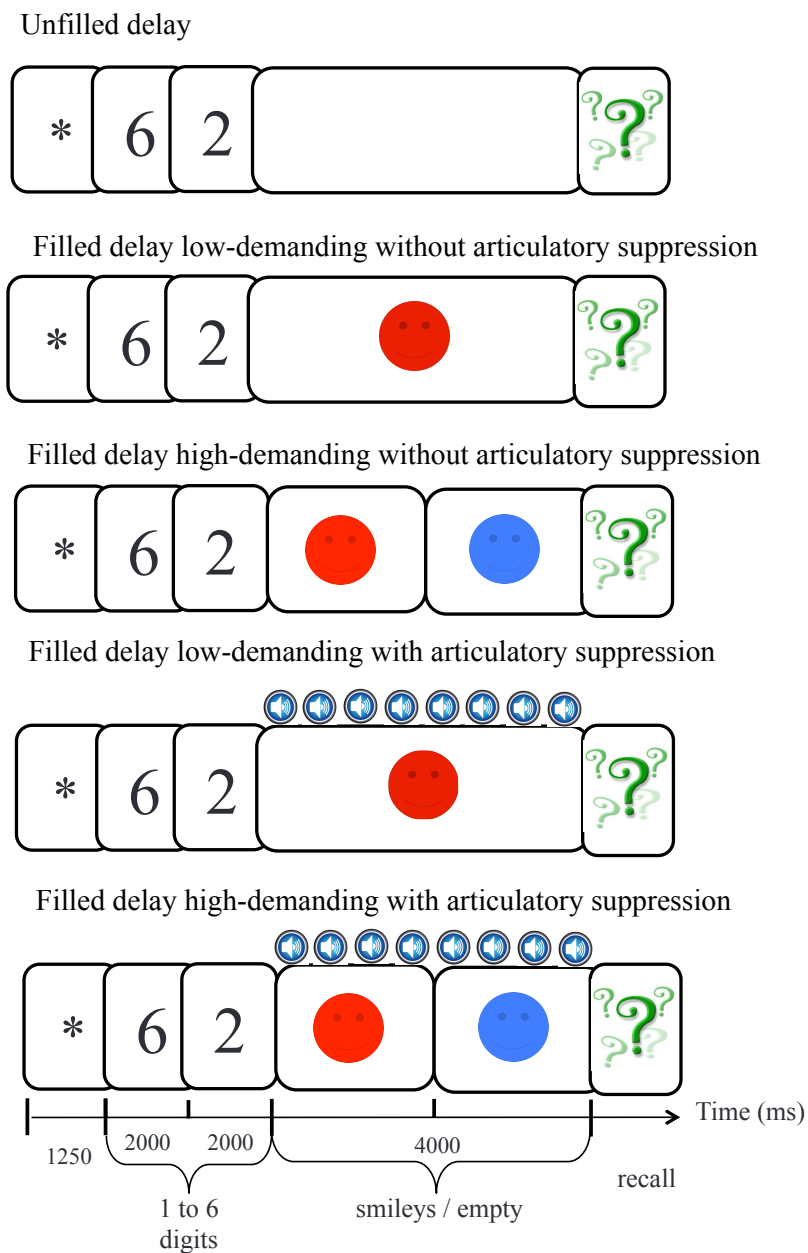


Figure III-3 : Illustration of different tasks used in Experiment 2.

III.2.2. RESULTS

Data from 9 children were discarded: 3 kindergarteners committed lower than 50% of correct responses on the concurrent task, and 2 kindergarteners and 4 first graders in the articulatory suppression condition forgot to repeat “oui” to each tone in more than one third of the trials. The remaining 115 children (37 kindergarteners, 38 first graders and 40 second graders) had a mean rate of correct responses of 93% ($SD = 10$) and 87% ($SD = 11$), for 1- and 2-smileys conditions respectively.

As in the previous experiment, an ANOVA was performed on the percentage of correct responses during the concurrent task, with age (6, 7 and 8 years) and concurrent articulation (no vs. yes) as between-subjects factors and type of filled task (1 vs. 2 smileys) as within-subjects factors. As previously observed, the percentage of correct responses was already high at 6 (87%, $SD = 13$), and significantly increased with age with 92% ($SD = 10$) at 7, and 91% ($SD = 9$) at 8, $F(2, 109) = 4.68$, $p < .02$, $\eta_p^2 = .08$. However, pairwise comparisons with Bonferroni adjustments indicated that difference between 7 and 8 was not significant ($p = 1.00$), the difference between 6 and 8 failed to reach significance ($p = .07$) and the difference was significant between 6 and 7 ($p < .02$). Concurrent articulation affected correct responses, such that concurrent articulation (93%, $SD = 9$) improved concurrent task accuracy than without (87%, $SD = 12$), $F(1, 109) = 15.56$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .13$. Percentage of correct recall was better for the low-demanding task with 1 smiley ($M = 93$, $SD = 10$) than the high-demanding task with 2 smileys ($M = 88$, $SD = 11$), $F(1, 109) = 33.07$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .23$. The interaction between task and age was significant, $F(2, 109) = 4.06$, $p = .02$, $\eta_p^2 = .07$. Indeed, 6 and 7 year olds showed more correct responses in the low-demanding task with 1 smiley than in high-demanding task with 2 smileys, $F(1, 35) = 22.10$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .39$ and $F(1, 36) = 10.22$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .22$, respectively, whereas the type of task had no impact at 8 year olds' accuracy, $F(1, 38) = 2.61$, $p = .12$, $\eta_p^2 = .06$. All other interactions were not significant, $F_s < 1$.

A similar ANOVA was performed on response times for the concurrent task. Response times significantly decreased with age: 1228 ms ($SD = 314$) at 6, 1105 ms ($SD = 225$) at 7 and 1023 ($SD = 229$) at 8, $F(2, 109) = 7.10$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .12$. However, pairwise comparisons with Bonferroni adjustments indicated that difference between 7 and 8 was not significant ($p = .39$), failed to reach significance between 6 and 7 ($p = .09$) and was significant between 6 and 8 ($p < .01$). Responses times were slower during the low-

demanding task with 1 smiley ($M = 1294$, $SD = 355$) than the high-demanding task with 2 smileys ($M = 938$, $SD = 189$), $F(1, 109) = 236.28$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .68$. This effect of type of task interacted with age, $F(2, 109) = 10.64$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .16$. Whereas response times for the filled task with 2 smileys remained stable across age ($M = 938$ ms, $SD = 189$, $F < 1$), response times for the filled task with 1 smiley significantly decreased with age ($M = 1470$ ms, $SD = 426$ at 6; $M = 1284$ ms, $SD = 285$ at 7 and $M = 1142$ ms, $SD = 263$ at 8). All other interactions and the effect of concurrent articulation were not significant, $F_s < 1$. To summarize these analyses of the concurrent task performance, children in each age group paid enough attention to the concurrent task and achieved a high level of accuracy. Moreover, the high-demanding task with 2 smileys yielded lower accuracy than the low-demanding task with one smiley.

Finally, a mixed ANOVA was performed on the mean spans, with age (6, 7 and 8 years old), concurrent articulation (no vs. yes), and task (simple span, unfilled delay, filled delay with 1 smiley and filled delay with 2 smileys), with age and concurrent articulation as between-subjects factors and task as a within-subjects factor. As predicted, recall performance increased with age, $F(2, 109) = 41.95$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .44$. In fact, 8-year-old children ($M = 3.73$, $SD = .91$) recalled more digits than 7-year olds ($M = 3.38$, $SD = .91$), who in turn recalled more than 6-year olds ($M = 2.44$, $SD = .83$). Pairwise comparisons with Bonferroni adjustments indicated that all of the differences between age groups were significant ($ps < .05$). There was also a significant task effect, $F(3, 327) = 50.50$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .32$. Indeed, pairwise comparisons with Bonferroni adjustments indicated that recall was better in the unfilled-delay condition ($M = 3.71$, $SD = .96$) compared to all other conditions ($M = 3.03$, $SD = 1.00$), $ps < .001$. Pairwise comparisons with Bonferroni adjustments also indicated that all differences between simple span, filled delay with 1 smiley or filled delay with 2 smileys conditions did not differ significantly ($ps > .10$). The interaction between age and type of response, as well as the 3-way interaction, were not significant $F_s < 1$. The interaction between task and the age was significant, $F(6, 327) = 7.52$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .12$. To investigate this interaction as in the first experiment, complementary analyses were performed on recall scores.

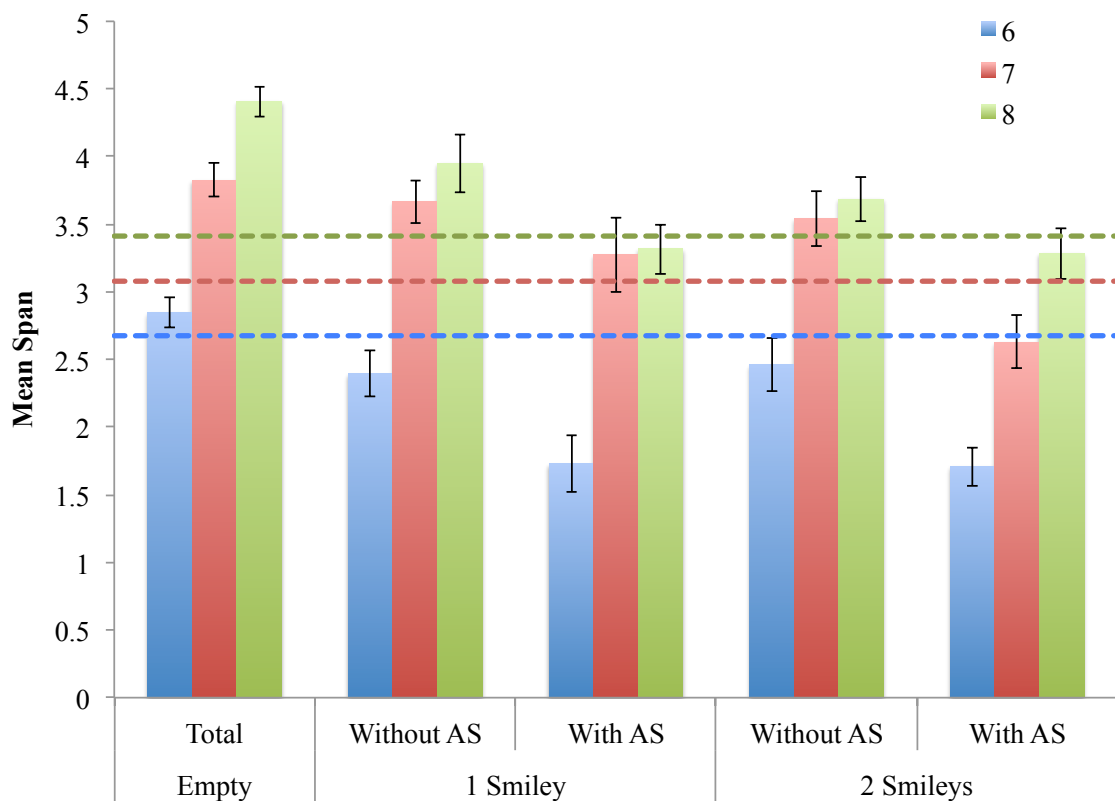


Figure III-4 : Mean spans according to the type of tasks (empty delay, 1 smiley, 2 smileys), the concurrent articulation [With AS vs. without AS (Articulatory Suppression)] and the age. Dotted lines represented simple span condition. Y bars represented standard errors.

Simple span versus unfilled delay

A similar ANOVA was performed on the mean spans to investigate the impact of the delay with age (6, 7 and 8 years old) as a between-subjects factor and delay (with vs. without) as a within-subjects factor. The interaction between delay and age was significant, $F(2, 109) = 12.83, p < .0001, \eta_p^2 = .19$. As in the first experiment, a clear pattern emerged from this analysis (Figure III-4). Recall in 6-year-old children was not affected by the delay ($F(1, 35) = 2.31, p = .14$), whereas it was improved by the introduction of a delay in 7- and 8-year-old children, $F(1, 36) = 43.85, p < .001, \eta_p^2 = .55$ and $F(1, 38) = 73.61, p = .001, \eta_p^2 = .66$, respectively. Thus, as the age of the children increased, the more they benefited from this delay with no advantage at 6, an increase of recall between simple span task and unfilled delay span task of 0.70 at 7 and a significantly higher increase of 1.00 at 8.

Introduction of a concurrent task and variation of its cognitive load

A similar ANOVA was performed on the mean spans in silent condition to investigate the impact introducing a task during a delay and varying its cognitive load, with age (6, 7 and 8 years old) as a between-subjects factor and task (unfilled delay, filled delay with 1 smiley and filled delay with 2 smileys) as a within-subjects factor. The type of task significantly affected recall performance, with 3.59 ($SD = 1.01$) in unfilled delay condition, 3.33 ($SD = 1.06$) in filled delay condition with 1 smiley and 3.22 ($SD = 1.01$) in filled delay condition with 2 smileys, $F(2, 118) = 9.30$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .14$. Moreover, pairwise comparisons with Bonferroni adjustments indicated that all differences between the conditions were significant ($ps < .02$) except between filled delay condition with 1 smiley and filled delay condition with 2 smileys ($p = .66$). However, separate ANOVAs for each age group revealed that the type of task had no impact at 6 and 7 ($F(2, 40) = 2.07$, $p = .14$, and $F < 1$, respectively) and affected recall at 8, $F(2, 38) = 12.46$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .40$). Thus, introducing a task performed without articulatory suppression had a detrimental effect on recall performance at 8, regardless of the cognitive load of this task, $ps < .02$, but varying its cognitive load had no impact, $p = .37$.

Manipulation of type of responses and of cognitive load

A similar ANOVA was performed on the mean spans to investigate the impact varying cognitive load and the type of responses with age (6, 7 and 8 years old) and concurrent articulation (no vs. yes) as between-subjects factors and task (filled delay with 1 smiley and filled delay with 2 smileys) as a within-subjects factor. Concurrent articulation had a detrimental effect on recall performance, $F(1, 109) = 19.44$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .15$. No interaction appeared between concurrent articulation and the age, $F < 1$. Variation of cognitive load by the manipulation of number of smiley during filled delay had an impact on recall performance, $F(1, 109) = 5.70$, $p < .02$, $\eta_p^2 = .05$. Indeed, for low-demanding task (filled delay with one smiley) recall performance 3.10 ($SD = 1.14$) was better compare to high-demanding task (filled delay with two smileys) 2.93 ($SD = 1.05$). Variation of cognitive load failed to interact with age, $F(2, 109) = 2.66$, $p = .08$, $\eta_p^2 = .05$. Separate ANOVAs for each age group revealed that increasing cognitive load had a detrimental effect at 7, $F(1, 36) = 8.84$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .20$, and had no significant effect at 6 and 8, $F < 1$ and $F(1, 38) = 1.83$, $p = .19$, respectively. No interaction appeared between manipulation of

attentional demand of the concurrent task and concurrent articulation, $F < 1$. No other interaction was significant, $ps > .10$.

III.2.3. DISCUSSION

The second experiment evaluated the developmental improvement of maintenance mechanisms using the Brown-Peterson paradigm, similar to the first experiment. More precisely this experiment attempted to dissociate the effects induced by the introduction of a dual-task and those induced by varying its attentional demand.

However, in the first experiment, the manipulation of refreshing was conducted only by introducing a delay or a concurrent task, whereas in this second experiment this manipulation concerned the attentional demand of the concurrent task. Despite the difference in manipulating the use of refreshing and the induction of a specific task for concurrent articulation, both experiments showed a reduction of recall under articulatory suppression and increase of recall with age. In both experiments, the introduction of a delay between encoding and recall improved recall in children above 7, but had no impact on 6-year-old children. This effect was at odds with Tam et al. (2010) and Barrouillet et al. (2009) findings, and its implications will be further discussed in the General Discussion. Moreover, when the concurrent task was added, recall decreased for 8-year-old children and the increase of attentional demand of this concurrent task reduced the recall regardless of the age of the child. The impediment of recall shown in younger children under articulatory suppression or when a concurrent attentional demand was added is at odds with previous findings sustaining the idea of the emergence of maintenance strategies around the age of 7. In line with the first part of this thesis, no interaction between articulatory rehearsal and attentional refreshing emerged in this second experiment, supporting the view that the two mechanisms are independent.

III.3. Joint analyses

The concurrent tasks in the two experiments, the location judgement task and the color discrimination task, likely differed in the amount of attention necessary to perform the tasks. To combine and compare the results obtained in both experiments, joint analyses based on the cognitive load of each attentionally demanding concurrent task were performed. This cognitive load was calculated by dividing, per participant, in each condition, the average time

required to perform the concurrent task by the time available to complete it (i.e., cognitive load; Barrouillet et al., 2004). For example, in the second experiment, the cognitive load for a child who took 1.56 sec on average to perform aloud the concurrent task with 1 smiley that was presented for 4 sec would be 0.39 (i.e., $1.56 / 4 = 0.39$).

Pearson correlations between cognitive load and span were performed for each condition (with or without articulatory suppression) in each age group (6, 7, 8 or 9) across both experiments. In the following table, all Pearson correlations and their significance for each age group and condition are shown. If we consider the age groups, there was a strong relationship between mean span and cognitive load in the conditions with articulatory suppression.

Table III-2 : Pearson correlations between span an cognitive load for each age group in each condition.
**p < .05, **p < .01.*

Age groups \ Conditions	Without articulatory suppression	With articulatory suppression
6	-0.08	-0.20
7	-0.07	-0.40**
8	-0.40**	-0.36**
9	-0.20	-0.37*

At 6, children span were not affected by the cognitive load regardless of articulatory suppression, with flat slopes and correlation coefficients of -0.08 and -0.20. Above 7, children's performance was negatively correlated with cognitive load in the aloud condition, whereas in the silent condition recall performance was not correlated with cognitive load except at 8. This correlation between cognitive load and recall performance above 7 years of age suggests that children switched to refreshing in aloud condition because rehearsal cannot be used and consequently were affected by cognitive load in aloud condition and not in silent condition. The results revealed that both maintenance mechanisms were involved in children's verbal working memory above 7 years of age, and they seem to be able to adapt their maintenance to the constraints induced by concurrent task. The results of older children aged over 7 were similar to adults showing two independent mechanisms (Camos, et al., 2009,

2011, 2013; Mora, Camos, 2013), whereas younger children do not appear to be affected by cognitive load. These results support the proposal that 6-year-old children cannot use attentional refreshing even when articulatory rehearsal is impeded. This result is in line with previous experiments that have not observed the effects of attentional refreshing before the age of 7 (Barrouillet et al., 2009; Camos & Barrouillet, 2011) and is inconsistent with others supporting the use of attentional refreshing before 7 (Tam et al., 2010).

III.4. GENERAL DISCUSSION

In two experiments, working memory recall of 6- to 8- or 9-year-old children was investigated using the Brown-Peterson paradigm that manipulated the use of maintenance mechanisms (i.e., attentional refreshing and articulatory rehearsal). These ages were examined because these maintenance mechanisms seem to emerge by the age of 7 (Barrouillet et al., 2009, Tam et al., 2010). Some experiments in adults have shown the independence of these two mechanisms to maintain verbal information. The aim of the present study was to investigate the strategy children use to maintain verbal information in working memory by manipulating the concurrent task performed in the time available between encoding and recall.

The first experiment focused on the impact of introducing an unfilled delay or a delay filled with a concurrent task between encoding and recall. The second experiment extended this exploration by varying the attentional demand of the concurrent task during the filled delay. In both experiments, the introduction of an unfilled delay had no impact on recall performance below the age of 7 and improved recall above 7. This suggests that children above 7 used this delay to refresh memoranda and improve their recall performance. If we suppose like in the TBRS model, that memoranda traces decline with time, the lack of decline at 6 in the present study indicates that pre-schoolers can use maintenance mechanisms before the age of 7. Consequently, children could begin to use maintenance mechanisms about 6 years of age.

This result is in line with Tam et al. (2010) that showed the use of maintenance mechanisms before the age of 7. Bertrand and Camos (2015) showed that before the age of 6 children cannot use maintenance mechanisms because they suffer of time decay. Our study complemented Bertrand and Camos's (2015) study showing that around 6 and 7 years of age children begin to use maintenance mechanisms, and after 7 the use of these mechanisms

seems to be more efficient. To sum up, children seem to begin to use maintenance mechanisms at around 6 and their use improves above the age of 7. However, with the introduction of an unfilled delay we cannot separate the effect of using articulatory rehearsal and the effect of using attentional refreshing because we cannot be sure of what 6-years olds are doing during the unfilled delay. Consequently we manipulated the use of attentional refreshing by introducing a concurrent task.

In the first experiment regardless age, recall performance was impeded when introducing a concurrent task. However, in the second experiment, this introduction impeded recall only in children aged 8, whereas 6- and 7-year-old children were not affected. Consequently even if the results of the first experiment could be explained by the impediment of attention, the results of the second experiment cannot. As proposed by Camos and Barrouillet (2011), this may result from the maintenance of an additional task-set, and not from the variation of attentional refreshing. In the second experiment, this color discrimination task between red and blue smileys should also be less demanding than the location task for younger children. Moreover, variation of attentional demand impeded recall at 7, but had no impact at 6 in the second experiment. This result is also congruent with joint analyses showing correlation between cognitive load and recall in aloud condition above 7, and not at 6. This result brought more evidence to the emergence of the use of attentional refreshing at the age of 7 (Barrouillet et al., 2009; Camos & Barrouillet, 2011).

Concerning the use of articulatory rehearsal, in both experiments the mean span of all children was diminished by the concurrent articulation relative to the silent tasks, even at 6 years of age. The introduction of concurrent articulation by adding a specific task (i.e., saying "oui" at the pace of beeps) or by introducing a concurrent articulation in the task (i.e., responding aloud while pressing keys) led to reduced recall across age groups. This result was congruent with several recent studies indicated the use of articulatory rehearsal before 7 (Henry et al., 2012; Tam et al., 2010). This result was also congruent with the use of maintenance mechanisms during the unfilled delay, replicating previous findings (Tam et al., 2010) that support the idea of the use of rehearsal before 7. Consequently, this result was inconsistent with the idea of a qualitative change at 7 (Gathercole et al., 1994). However, as suggested in the introduction of this Chapter III, these findings were not sufficient to fully discard the qualitative change conception. This qualitative change could appear earlier than expected by the Gathercole et al. (1994) and Hitch et al. (1991) findings. It could be possible that articulatory rehearsal begin to be available at around 6 years of age and attentional

refreshing at around 7 years of age. Joint analyses show that 7- and 9-year-old children used both mechanisms with an adaptive way. Indeed, they favour articulatory rehearsal when attention was less available and they switch to use attentional refreshing when articulatory rehearsal was impeded by an articulatory suppression.

To conclude, the present study reinforced previous findings on the independence of articulatory rehearsal and attentional refreshing to maintain verbal information in children. It also provides the first evidence of strategies used around 7, such that 7- and 9- year-old children favour the use of articulatory rehearsal and can use attentional refreshing in an articulatory suppression condition. Consequently, they are susceptible to the effects of attentional demand when articulatory rehearsal is impeded, evident with declining span as a function of increased cognitive load. Thus, this indicates that children above 7 can engage in attentional refreshing as well as articulatory rehearsal. The present study is the first to underline this adaptive capacity in children even before 7 years of age for the maintenance of verbal information in working memory.

Chapitre IV : Effet de la longueur des mots, de la similarité phonologique et des rimes

The impact of phonological similarity, rhyme and word length on the verbal maintenance in children's working memory.

ABSTRACT

Two mechanisms allow the maintenance of verbal information in working memory: articulatory rehearsal and attentional refreshing. Phonological effects, like word length effect and phonological similarity effect, have been shown to affect maintenance of verbal information in adults. However, these effects disappear with articulatory suppression. The aim of the present study was to assess the interplay between these mechanisms and to explore these phonological effects in 6- to 8-year-old children. In two complex span tasks, the opportunity for refreshing was manipulated by varying the attentional demand of the concurrent task. Simultaneously, the subvocal rehearsal was impeded by asking children to perform the concurrent task aloud. In the first experiment, children had to maintain lists of similar (with one similar phoneme), rhyming (with two similar phonemes) or dissimilar words, whereas in the second experiment they had to maintain lists of either short or long words. Confirming the predictions of the study, the independent detrimental effects of articulatory suppression and increased attention demand on working memory recall were replicated. Concurrent articulation had an impact on recall performance even at age 6. The phonological similarity effect appeared from the age of 6, with or without concurrent articulation, and in 8-year-old children without articulatory suppression. The rhyming effect had no impact on recall performance in complex span task regardless of age. The word length effect appeared in children above 7 years of age and did not interact with concurrent articulation or manipulation of attentional demand. To conclude, the efficiency of attentional refreshing and articulatory rehearsal improved from 6 to 8 years of age, with the phonological characteristics of the memoranda impeding working memory recall in different ways.

Working memory can be defined as the ability to maintain information in the face of concurrent distraction from a secondary processing task. To maintain verbal information in working memory, recent studies have highlighted two mechanisms: A general mechanism based on attention, attentional refreshing, and another mechanism specific to the maintenance of phonological representations, articulatory rehearsal (e.g. Camos et al., 2009; Camos et al., 2013; Camos et al., 2011; Hudjetz & Oberauer, 2007; Magimairaj & Montgomery, 2012; Mora & Camos, 2013; Mora & Camos, 2015). Some studies exploring these two systems showed their impact on recall performance and provided evidence of their independent and additive effects (Camos et al., 2009; 2013; 2011; Hudjetz & Oberauer, 2007; Mora & Camos, 2013). In children, only three studies investigated the relationships between these two mechanisms in children (Magimairaj & Montgomery, 2012; Mora & Camos; Tam et al., 2010). Both mechanisms are already in use by the age of 7 (Barrouillet & Camos, 2015). The present study included two experiments aiming at evaluating the developmental improvement between these two mechanisms from 6 to 8 years old through the exploration of phonological effects. We chose to investigate phonological similarity effect, rhyming effect and word length effect because they have been considered as evidence for a specific system of maintenance of verbal information.

Articulatory rehearsal originally described in Baddeley's (1986) model is the most studied mechanism. This mechanism is specific to verbal information and several effects linked to its use have been described (Baddeley, 2007). Baddeley (2007) described the phonological similarity effect and the word length effect. The word length effect is expressed by a decrease in recall for lists of long words compared to lists of short words. This can be explained by the fact that it takes longer to rehearse long words and to produce them during recall. Another effect showing that we maintain verbal information under phonological codes is the phonological similarity effect. This effect is expressed by lower recall performance for lists of similar words compared to lists of dissimilar words because lists of phonological similar words leads to more confusion than lists of phonologically dissimilar words. However in adults, this effect disappeared when words were similar to the point of being rhyming words (e.g., Tehan & Humphreys, 1995). Some studies even showed a facilitator effect of the rhymes (Copeland & Radvansky, 2001; Fournet et al., 2003). This shows again that maintenance of verbal information implies phonological codes, where each word could be a cue to find the others. All these effects reinforce the existence of articulatory rehearsal mechanism using phonological codes.

The second mechanism, a more general system, allows verbal information to be maintained under multimodal representations. This mechanism permits a deeper and more elaborative processing of information and is based on attention. Memory traces are reactivated by an executive loop according to the TBRS.

Distinctions between these two mechanisms have been well studied in adults. Studies in both behavioral and neuropsychological domains report differences. Hudjetz and Oberauer (2007) have demonstrated that there is another system separated from articulatory rehearsal to maintain verbal information. This system permits the maintenance of verbal information even when rehearsal was constrained by articulatory suppression. Using a reading span task, the authors manipulated the use of rehearsal and the amount of attention available for maintenance. Pace of presentation of each segment of reading sentences was manipulated, the fast pace led to reduced availability of attention for maintenance compared to the slow pace. The authors also manipulated the reading instructions; continuously reading should impede the use of articulatory rehearsal compared to reading at own pace. Recall performance was reduced by continuous reading and also by fast pace, but no interaction appeared between type of reading and pace presentation. This suggests that another mechanism, distinct from articulatory rehearsal, permits the maintenance of verbal information. Following this experiment, further evidence of this distinction was shown in a series of experiments using complex span task (Camos et al., 2009). In these tasks, adults had to maintain letters while they performed a concurrent task. During this concurrent task, the authors independently manipulated the use of maintenance mechanisms. Whereas introducing a concurrent articulation impeded articulatory rehearsal, increasing concurrent attentional demand impeded attentional refreshing. Recall performance was reduced by both manipulations, but no interaction appeared between both factors and an additive effect was highlighted. Moreover, Camos et al. (2009) showed that adults could choose between these two mechanisms and this choice depends on the instructions of the task, and also on attentional demand of concurrent processing. This last experiment showed that when attentional demand was highly demanding, adults favor articulatory rehearsal. Conversely, when memoranda are phonologically similar, attentional refreshing was favored to reduce confusion on recall. More recently, using complex span task, Mora and Camos (2013) and Camos et al. (2013) showed that the phonological similarity effect and word length effect were similarly affected by the manipulation of both mechanisms in adults. In these studies, participants had to maintain words while manipulation of the availability of both mechanisms was orthogonally

manipulated in a fully crossed design. While Mora and Camos (2013) manipulated also phonological similarity of words by presenting lists of phonologically similar words or lists of phonologically dissimilar words, Camos et al. (2013) added to the manipulation of both mechanisms the manipulation of word length presenting lists of short words composed by monosyllabic words and lists of long words composed by disyllabic words. Whatever the manipulation of phonological similarity or word length, the results of these studies suggest that these effects depend on the system used to maintain verbal information. Whereas the phonological similarity effect and word length effect had a detrimental effect on recall performance when articulatory rehearsal was available, these effects were greatly reduced and could disappear when articulatory rehearsal was impeded and attentional refreshing was available. To sum up, the phonological characteristics of memoranda impact recall performance, only when articulatory rehearsal was available. This result was congruent with the independence of both mechanisms.

In children, the relationships between articulatory rehearsal and attentional refreshing have been less investigated. Most studies relating to maintenance mechanisms of verbal information in working memory were dedicated to the development of each mechanism separately. Development of articulatory rehearsal was the most studied and revealed the emergence of articulatory rehearsal at around 7. Indeed, phonological similarity of visually presented stimuli reduced recall performance in children above 7, whereas younger children were affected by visual similarity (Gathercole et al., 1994; Hitch et al., 1991) and lip movements in children older than 7 indicated the use of rehearsal (Gathercole et al., 1994). However, this qualitative change at around 7 is questioned, because studies showed lips movements before 7 (Al-Namlah et al., 2006; Henry et al., 2012; Jarrold & Tam, 2011; Tam et al., 2010). Fewer studies have investigated the development of attentional refreshing. These studies support the same view evidencing the emergence of the use of attentional refreshing around 7 years (Barrouillet & Camos, 2012; Barrouillet et al., 2009; Flavell et al., 1966; Gaillard et al., 2011). For example, Barrouillet et al. (2009) showed that the increase of attentional demand of a concurrent task had no effect on children below 7, whereas this manipulation reduced recall performance in older children. Moreover, the efficiency of attentional refreshing increases until 14, and at 14 children used this mechanism as well as young adults do (Camos and Barrouillet (2011). To sum up, both mechanisms are available at 7 years of age. However, besides the first 2 studies of this thesis only three studies have investigated the developmental improvement of these mechanisms. Using mostly the Brown-

Peterson paradigm, several studies (Magimairaj & Montgomery, 2012; Mora & Camos, 2015; Tam et al., 2010) manipulated the type of tasks introduced between presentation of memoranda and their recall. Tam et al. (2010) compared a simple span task to an unfilled delay span task. During the delay, children were free to use any maintenance mechanisms. When a concurrent task was added, verbal or non-verbal processing impeded the use of rehearsal and refreshing respectively. Moreover, memory lists were composed of either phonologically similar or dissimilar words. The introduction of unfilled delay reduced recall performance as compared to a simple span task. The introduction of a task during this delay reduced also recalls performance. Verbal processing induced a higher reduction of recall than the non-verbal task, perhaps because both rehearsal and refreshing were impeded during verbal processing and not only rehearsal. This reduction was stronger in 8 year-old compared to 6-year-old children. These results highlighted the use of rehearsal before the age of 7 and showed that 6-year-old children used rehearsal, although to a lesser extent than the 8-year olds. Moreover, whatever the age, children were affected by the phonological similarity effect with the recall performance decreasing when words were phonologically similar. This effect disappeared when the concurrent task was a verbal processing task and impeded the use of articulatory rehearsal. As in adults, articulatory rehearsal and attentional refreshing are independent in children. Magimairaj and Montgomery's (2012) study in 7- to 11-year-old children reinforced this finding and revealed with correlational analysis that these two maintenance mechanisms contributed to independent and unique variance. However, this study did not investigate age-related differences like Mora and Camos's (2012) study.

Nevertheless, Mora and Camos (2015) investigated the potential interaction between articulatory rehearsal and attentional refreshing in 8-year-old children. The authors also investigated the impact of phonological characteristics of memoranda as they did in adults. In complex span tasks the authors showed that the impediment of both mechanism led to reduce recall. Moreover, as in adults, and as previously showed in first and second experimental studies of this thesis, the manipulation of both mechanisms in children did not interact. This study also confirmed Tam et al.'s results concerning the phonological similarity effect that disappeared when rehearsal was impeded. Concerning other phonological effects, the word length effect was well studied with simple span tasks and children as young as four years old were impeded by this effect (e.g., Henry et al., 2012; Henry & Millar, 1991; Henry et al., 2000; Hulme, Maughan, & Brown, 1991; Romani, McAlpine, Olson, Tsouknida, & Martin, 2005). For the complex span task, only three studies explore this effect, in adults only

(LaPointe & Engle, 1990; Mora & Camos, 2013; Tehan et al., 2001). All of these experiments showed a word length effect in complex span tasks with a better recall of short words than long words. Moreover, Mora and Camos (2013) showed that word length effect disappeared when articulatory rehearsal was impeded by a concurrent articulation. However, no study investigates this effect in conjunction with rhyming effects in children with working memory span task. Consequently, this study needs to be extended to other phonological characteristics of memoranda like rhymes or word length effect. This study was the first to investigate these effects in children with working memory span tasks.

The present study

The aim of the present study was to investigate the effect of phonological aspects and the developmental improvement of articulatory rehearsal and attentional refreshing between 6 and 8 years of age. For this purpose, we manipulated in the same task the opportunity to use articulatory rehearsal and attentional refreshing, and the phonological aspects of words lists to memorize. Contrary to Tam et al (Camos et al., 2013; Mora & Camos, 2013), this design examined the interaction between both mechanisms, because children performed different complex span tasks in which the opportunity to use articulatory rehearsal and attentional refreshing was orthogonally manipulated. This fully crossed design to examine the interactions between both mechanisms was already used in one study but only with 8-year-old children (Mora & Camos, 2015). This study investigates the developmental improvement of both mechanisms and phonological characteristics of memoranda in 6- to 8-year-old children. To manipulate the use of attentional refreshing, children had to perform two tasks. The low-demanding task was a simple reaction time task in which children had to press a key as soon as an animal appeared and the high-demanding task was a choice reaction time task, in which children had to judge if the presented picture was in black-and-white or in color. To manipulate the use of articulatory rehearsal, children had to perform the concurrent task either silently by pressing keys or aloud by pressing keys while saying aloud the response. As in Mora and Camos (2015) and Tam et al. (2010), we manipulated the phonological characteristics of the memoranda. In the first experiment, we manipulated the phonological similarity of memoranda by presenting lists of similar, dissimilar or rhyme words. In the second experiment we manipulated the word length of the memoranda by presenting lists of short or long words.

We expected that children older than 7 should be able to use both mechanisms. Thus, we predicted a reduction of recall performance under articulatory suppression and also when the concurrent task was highly demanding. For younger children, we expected a decrease of recall at least under articulatory suppression. We also expected an independence of both mechanisms for all age groups. If adults were impeded by phonological similarity effect only when articulatory rehearsal was available, we can expect an extension to the two others phonological effects. As a consequence rhyming effect and word length effect should appear under rehearsal. However it remained an open question as reported previously the literature is rather incongruent on this issue.

IV.1. EXPERIMENT 1

The first experiment was designed to evaluate the impact of the phonological similarity effect and the rhyming effect on the maintenance of verbal information in children between 6 and 8 years of age. The use of articulatory rehearsal and attentional refreshing was orthogonally manipulated in this experiment, and the memoranda were presented in lists of phonologically dissimilar or similar words with one or two similar phonemes. Lists of phonologically similar words were composed of similar words with one similar phoneme in common, whereas lists of rhyming words were composed by words with two similar phonemes.

IV.1.1. METHOD

Participants

One hundred eighty-two children participated in the experiment: 67 kindergarteners (33 boys, mean age = 5 years 11 months, $SD = 6$ months), 63 first graders (32 boys, mean age = 7 years, $SD = 5$ months), and 52-second graders (26 boys, mean age = 8 years 1 months, $SD = 6$ months). There were all French native speakers from primary schools in Switzerland, and none of children had difficulties with perceiving colors. Permission for recruitment was gained from local authorities, as well as written informed consent from the children's caretakers. None of them participated in the other experiments of this thesis.

Materials

Lists of to-be-remembered words were built from an initial set of 222 singular French nouns selected from *Lexique 3* (New et al., 2001) . All words were three-phonemes long with a CVC structure and an age of acquisition (AoA) below 60 months.

Three sets of 18 lists with three words per list were built: One set with 18 lists of three phonologically similar words, one set with 18 lists of three rhyming words and one set with 18 lists of three phonologically dissimilar words. Each word appeared three times, one time in each set. For example, for a phonologically similar list, the word “rire” was presented in one set with “chic” and “mille”, which are two phonologically similar words with only a central phoneme in common. In the second set, for a rhyme list, “rire” was presented with “dire” and “tir”, which are two rhyming words with “rire”, with a central and a final phoneme in common. In the third set, for a phonologically dissimilar list, “rire” was presented with two phonologically dissimilar items “serre” and “cape” without a common phoneme (Annex 1). Consequently, the 54 lists of 3 words comprised 54 words that were each presented 3 times, one time in each set. The 54 lists were split into three groups, with each group composing three blocks of six lists per block. Within a block, two lists were composed of phonologically similar words, two lists composed of rhyming words and two lists composed of phonologically dissimilar words. Each subgroup of two lists was arranged to have a similar mean frequency as the other subgroups according to *Lexique 3* (New et al., 2001). The lists were randomly presented within each block. We controlled that each word appeared only one time in each group. Participants were assigned to one of the three groups with a counterbalanced order. All words were recorded by a female voice and presented through headphones with a controlled duration that never exceeded 1-second.

For the concurrent task, 54 animal pictures were selected from an initial pool of 230 pictures from *Lexique 3* (New et al., 2001). The age of acquisition of the name of the animals in the pictures was less than 74.5 months according *Lexique 3* (New et al., 2001) and the frequency was among the highest according the LEXIQUE database (Chalard et al., 2003). All of the pictures appeared twice during the experiment, once in color and once in black-and-white.

Pre-test

The set of 54 words was pre-tested on 118 children: 37 kindergarteners (17 boys, mean age = 6 years 2 months, $SD = 5$ months), 43 first graders (24 boys, mean age = 7 years 3 months, $SD = 6$ months), and 38-second graders (19 boys, mean age = 8 years 6 months, $SD = 6$ months). Like the participants of the critical experiment, the participants in the pre-test were also all native French speakers from primary schools in Switzerland, and permission for recruitment was gained from local authorities, as well as written informed consent from the children's caretakers. The words were presented through headphones in random order. Children had to determine if they already knew these words or not. For each word, we recorded the percentage of children who knew them: 68% of kindergarteners ($SD = 17$), 71% of first graders ($SD = 19$), and 87% of second graders ($SD = 15$) already knew these words.

Procedure

The experiment was presented on a screen using Psyscope software (Cohen, Macwhinney, Flatt, & Provost, 1993). Participants were presented with three test blocks. The first block presented a simple span task to control for the baseline recall level of all participants. During this first block, a trial started with an asterisk during 1000 ms. then three words were presented successively during 1000 ms each. Recall followed directly the last word. Following this control block, two blocks of complex span were presented in a counterbalanced order across participants. Each trial began with an asterisk centered on screen for 1000 ms, followed by a word for 1000 ms. This word was then followed by the two successively presented pictures, presented for 1800 ms (with an inter stimulus interval of 200 ms). Afterward, the second word appeared, and this sequence repeated for a total of three words in the trial. At the end of the trial, a question mark appeared after 200-ms delay to prompt the participants to orally recall the words in the same order as they were presented. The experimenter wrote down all responses on a sheet, and systematically asked children the position of each recalled item. Each word recalled in the correct position was counted and the percentage of correct recall was calculated for each condition.

For the concurrent task, children had to either complete a simple reaction time task or a color discrimination task, the order of which depended on the counterbalance. For the simple reaction time task, children had to push the "b" key on the keyboard as soon as an animal appeared. An animal picture was stuck on this key. For the color discrimination task,

the children had to determine if pictures were either in color or in black-and-white by pressing the corresponding color buttons on Swiss keyboard. Children pushed the key “c” with three color circles (red, blue, yellow) if picture was in color, and the “n” key with 2 circles (one black and one white) if picture was black-and-white. Moreover, to induce an articulatory suppression, half of the sample had to perform a concurrent articulation by responding aloud while pressing keys.

IV.1.2. RESULTS

Data from 4 children were discarded: 2 kindergarteners and 2 first graders obtained less than 50% of correct responses on the concurrent task. The remaining 65 kindergarteners, 61 first graders and 52 second graders had a mean rate of correct responses of 91% ($SD = 10$).

Analyses of the concurrent tasks

To control that children did their best to perform the concurrent task, and to control that simple reaction time task was less attentional demanding than color discrimination task, analyses were conducted on percentage of correct responses and response times on the concurrent tasks. A mixed analysis of variance (ANOVA) was performed on the percentage of correct responses with age (6, 7 and 8 years), type of responses (keyed vs. aloud) as between-subjects factors, and concurrent task (simple reaction time task vs. color as a within-subjects factor). Percentage of correct responses was already high at 6 with 89% ($SD = 11$), and significantly increased with age with 92% ($SD = 9$) at 7 and 93% ($SD = 8$) at 9, $F(2, 172) = 4.93$, $p < .01$, $\eta_p^2 = 0.05$. Pairwise comparisons with Bonferroni adjustments indicated that all differences were significant ($ps < .05$), except between 7 and 8 ($p = .49$). Percentage of correct responses was higher when children had to response aloud (93%, $SD = 8$) than when only pressing keys (89%, $SD = 11$), $F(1, 172) = 18.66$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .10$, so the aloud condition did not induce a triple task. As expected simple reaction time task ($M = 93$, $SD = 9$), induced higher percentage of correct responses than color discrimination ($M = 89$, $SD = 10$), $F(1, 172) = 19.57$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .10$. No interaction was significant, $F_s < 1$.

A similar mixed ANOVA was performed on response times. This analysis revealed an age effect with 8-year-old children (872 ms, $SD = 148$) faster than 7-year olds (930 ms, $SD = 143$) and faster than 6-year olds (971 ms, $SD = 147$), $F(2, 172) = 9.28$, $p < .001$,

$\eta_p^2 = .10$. Pairwise comparisons indicated that all differences were significant ($ps < .05$) except between 6 and 7 ($p = .06$). As expected, children were significantly faster in simple reaction time task (754 ms, $SD = 165$) than in color discrimination (1102 ms, $SD = 137$), $F(1, 172) = 904.33$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .84$. The type of responses did not affect the responses times (aloud: 932 ms, $SD = 149$ vs. keyed: 925, $SD = 152$), $F < 1$, but this effect interacted with concurrent task with a higher differences in responses times between the two types of task in aloud (383 ms) than in silent conditions (316 ms), $F(1, 172) = 9.25$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .05$. No other interaction was significant, $ps > .15$.

Control of Phonological effects in simple span task

To control that children assigned to the keyed and aloud response groups did not differ in short-term memory capacity and verify phonological effects, we performed two ANOVAs on percentage of correct responses in simple span condition. One ANOVA compared similar to dissimilar words for assessing the phonological similarity effect and the other one contrasted dissimilar to rhyming word for rhyming effect.

Phonological similarity effect

A mixed ANOVA was performed on the percentage of correct responses in simple span task condition with age (6, 7 and 8 years) and type of responses (keyed vs. aloud) as between-subject factors and type of words (similar vs. dissimilar) as within-subject factor. As expected there was a phonological similarity effect, with better recall for dissimilar words ($M = 77\%$, $SD = 25$) than for similar words ($M = 66\%$, $SD = 28$, $F(1, 172) = 22.87$, $p < .0001$). As also expected, recall performance increased with age $F(2, 172) = 16.07$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .16$ with 61% at 6 ($SD = 28$), 76% ($SD = 24$) at 7 and 81% ($SD = 22$) at 8. Pairwise comparisons with Bonferroni adjustments indicated that all differences were significant ($ps < .001$) except between 7 and 8 ($p = .47$). Concurrent articulation did not affect the percentage of correct responses in simple span task condition $F < 1$. Moreover, no interaction was significant, $ps > .36$. To examine in more details these effects, we performed an ANOVA in each age group. Lists of phonological similar words were less recalled than lists of phonological dissimilar words at 6 and 7, with $F(1, 63) = 16.78$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .21$, $F(1, 59) = 7.07$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .11$, and this effect failed to reach significance at 8,

$F(1, 50) = 3.43, p = .07, \eta_p^2 = .06$. As expected, concurrent articulation had no impact on recall performance with $F(1, 59) = 1.11, p = .30$ at 7 and $F_s < 1$ at 6 and 9. No interaction was significant, $F_s < 1$.

Rhyming effect

A similar ANOVA was performed on the percentage of correct responses in simple span task condition with age (6, 7 and 8 years) and type of responses (keyed vs. aloud) as between-subject factors and type of words (rhyming vs. dissimilar) as a within-subjects factor. As with the phonological similarity effect, the rhyming effect also appeared in these analyses, with better recall for dissimilar words ($M = 77\%$, $SD = 25$) than for rhyming words ($M = 70\%$, $SD = 25$), $F(1, 172) = 12.70, p < .0001$. As previously obtained, recall performance increased with age $F(2, 172) = 11.48, p < .0001, \eta_p^2 = .12$ with 64% at 6 ($SD = 27$), 77% ($SD = 23$) at 7 and 81% ($SD = 22$) at 8. Pairwise comparisons showed that all differences were significant ($ps < .001$) except between 7- and 8-year-old children ($p = .94$). Concurrent articulation still did not affect percentage of correct responses in simple span task condition $F < 1$ and no interaction was significant, $F_s < 1$. Similarly to the previous part, we performed an ANOVA in each age group. Lists of rhyming words were less well recalled than lists of phonological dissimilar words at 7 and 8, with $F(1, 59) = 5.26, p < .03, \eta_p^2 = .08$ and $F(1, 50) = 5.54, p < .03, \eta_p^2 = .10$ and this effect was not significant at 6, $F(1, 63) = 2.52, p = .12$. As expected, concurrent articulation had no impact on recall performance and no interaction was significant, $F_s < 1$.

Recall analyses in complex span tasks

The phonological similarity and rhyming effects were analyzed separately with two ANOVAs, one on similar and dissimilar words and the other on dissimilar and rhyming word.

Phonological similarity effect

A mixed ANOVA was performed on percentage of correct recall with age (6, 7 and 8 years) and type of responses (keyed vs. aloud) as between-subjects factors and type of words (similar vs. dissimilar) and type of task (simple reaction time task vs. choice reaction time

task) as within-subjects factors. As often reported in the developmental literature, recall performance significantly increased with age ($F(2, 172) = 21.75, p < .0001, \eta_p^2 = .20$): 30% ($SD = 23$) at 6, 40% ($SD = 27$) at 7 and 51% ($SD = 30$) at 8. The pairwise comparisons indicated that all differences between age groups were significant ($ps < .01$; Figure IV-1). The type of words had an effect on recall, with poorer recall for phonologically similar words ($M = 37\%$, $SD = 28$) than phonologically dissimilar words ($M = 42\%$, $SD = 25$), $F(1, 172) = 9.37, p < .01, \eta_p^2 = .05$. The type of task had an effect on recall performance, with poorer recall during the choice reaction time task (i.e., color discrimination; $M = 36\%$, $SD = 26$) than during the simple reaction time task ($M = 42\%$, $SD = 29$), $F(1, 172) = 11.04, p < .01, \eta_p^2 = .06$. Percentage of correct recall was also affected by concurrent articulation, with worse recall in the aloud condition ($M = 30$, $SD = 23$) than in the silent condition ($M = 48$, $SD = 29$), $F(1, 172) = 47.96, p < .001, \eta_p^2 = .22$. This effect just failed to interact significantly with age with a difference between silent and aloud conditions of 11% at 6, 19% at 7 and 26% at 8, $F(2, 172) = 2.66, p = .07, \eta_p^2 = .03$. No other interaction was significant, $ps > .11$.

We performed ANOVA in each age group to examine the age-related changes in the effect of the concurrent articulation, the type of words and variation in concurrent attentional demand. Concurrent articulation had a detrimental effect on recall performance whatever the age, with at 6, 7 and 8, $F(1, 63) = 8.46, p < .01, \eta_p^2 = .12$, $F(1, 59) = 14.63, p < .001, \eta_p^2 = .20$ and $F(1, 50) = 23.73, p < .001, \eta_p^2 = .32$, respectively. The type of task had a detrimental effect on recall performance at 7 with poorer percentage of recall during complex reaction time task compare to simple reaction time task, $F(1, 59) = 13.13, p < .01, \eta_p^2 = .18$. This effect was not significant at 6- and 8-year-old children with $F(1, 63) = 2.46, p = .12$ and $F < 1$, respectively. Phonological similarity had a detrimental effect on 6-year-old children, $F(1, 63) = 4.50, p < .04, \eta_p^2 = .07$, failed to be significant at 7, $F(1, 59) = 3.23, p = .08$, with a better recall when word were dissimilar than similar and had no impact on recall performance at 8, $F(1, 50) = 2.08, p = .16$. However, this effect interacts with the type of recall at 8, $F(1, 50) = 4.07, p = .049, \eta_p^2 = .22$, with a phonological similarity effect only when articulatory rehearsal was available. Whatever the age, no interaction was significant between articulatory rehearsal and attentional refreshing, with at 6 and 7, $F_s < 1$ and at 8, $F(1, 50) = 1.26, p = .27$, and no other interaction was significant, $ps > .13$.

Chapitre IV : Effet de la longueur des mots, de la similarité phonologique et des rimes

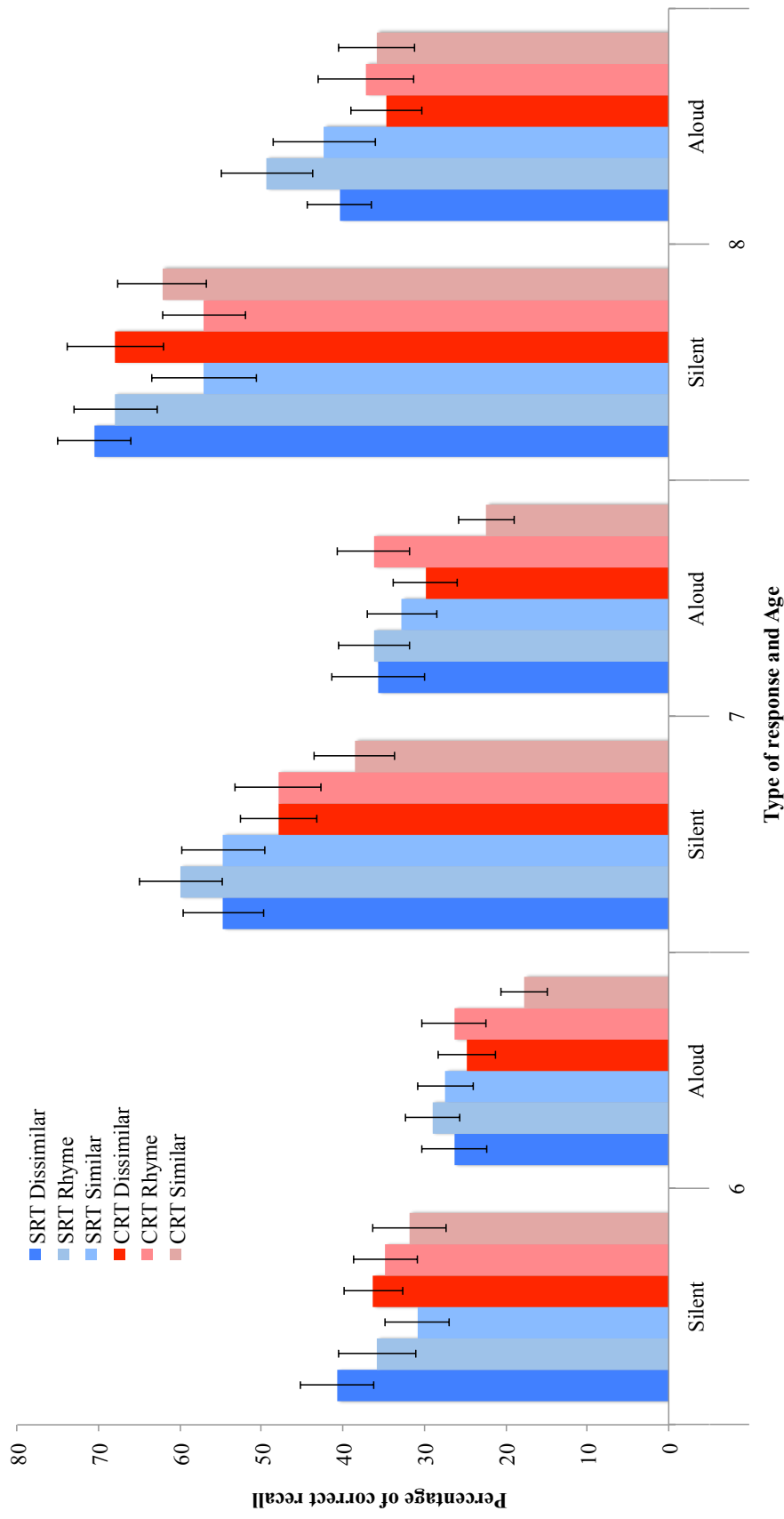


Figure IV-1 : Percentage of correct recall according to the type of tasks [SRT (Simple Reaction Time) vs. CRT (Choice Reaction Time = Color discrimination task)], the type of word (rhyme vs. similar vs. dissimilar), the type of responses (keyed vs. oral) and the age. Y bars represented standard errors.

Rhyming effect

A similar ANOVA was performed on percentage of correct recall, with age (6, 7 and 8 years) and type of responses (keyed vs. aloud) as between-subject factors and type of words (rhyming vs. dissimilar) and type of task (simple reaction time task vs. complex reaction time task) as within-subject factors. Consistent with the previous analysis, recall performance increased with age, $F(2, 172) = 23.12, p < .001, \eta_p^2 = .21$, with 32% at 6 ($SD = 23$), 44% at 7 ($SD = 28$) and 53% at 8 ($SD = 29$). Pairwise comparisons indicated that all of the differences between age groups were significant ($ps < .01$). The results also underlined an effect of task, with lower recall during the choice reaction time task ($M = 36\%$, $SD = 24$) than during the simple reaction time task ($M = 40\%$, $SD = 27$), $F(1, 172) = 11.76, p < .001, \eta_p^2 = .06$. Concurrent articulation had also a detrimental effect on recall performance, with 51% ($SD = 29$) when the task was performed silently and with 33% ($SD = 24$) when the task was aloud, $F(1, 172) = 49.03, p < .001, \eta_p^2 = .22$. Type of word did not impact recall performance, $F < 1$.

Interactions between concurrent articulation and age ($F(2, 172) = 2.90, p = .06, \eta_p^2 = .03$) and between concurrent articulation and type of words ($F(1, 172) = 3.29, p = .07, \eta_p^2 = .02$) just failed to reach significance. In fact, differences between percentages of correct recall in the aloud compared to the silent condition increased with age with 10% at 6, 18% at 7 and 25% at 8. Moreover, the decrease in recall under concurrent articulation was lower for rhyming words (15%) than dissimilar words (21%). No other interaction was significant, $ps > .36$. We performed ANOVA in each age group to examine the age-related changes. Regardless of age, differences between the aloud and silent conditions were all significant, $F(1, 63) = 7.65, p < .01, \eta_p^2 = .11$, $F(1, 59) = 15.42, p < .001, \eta_p^2 = .21$ and $F(1, 50) = 25.39, p < .001, \eta_p^2 = .34$, at 6, 7 and 8, respectively. The type of task had a detrimental effect on recall performance at 7 and 8 with poorer percentage of recall during choice reaction time task compare to simple reaction time task, with $F(1, 59) = 4.33, p < .05, \eta_p^2 = .07$ and $F(1, 50) = 6.52, p < .02, \eta_p^2 = .12$, respectively. This effect was not significant at 6, $F(1, 63) = 1.12, p = .30, \eta_p^2 = .02$. Regardless of age, the rhyming effect as well as the interaction between this effect and concurrent articulation never appeared, $F_s < 1$.

IV.1.3. DISCUSSION

This first experiment aimed at extending the evaluation of developmental improvement of maintenance mechanisms while phonological characteristics of memoranda were manipulated. Results showed that as previously observed in previous experiments of this thesis and in some previous studies, children are able to use rehearsal, even before 7 years of age because recall performance of children decreased under concurrent articulation (Tam et al., 2010). This result reinforced previous findings supporting the hypothesis of a use of articulatory rehearsal before 7 years of age (Al-Namlah et al., 2006; Henry et al., 2012; Jarrold & Tam, 2011; Tam et al., 2010). Moreover, no interaction appeared between the manipulation of articulatory rehearsal and the manipulation of attentional refreshing. Consequently, refreshing and rehearsal are two independent mechanisms to maintain verbal information. This effect reinforces previous findings of Mora and Camos (2015) obtained in a crossed design in 8-year-old children and extended this result to 6- and 7-years-old children.

This experiment also examined the effects of phonological characteristics on memory maintenance. Whereas the findings were in line with previous experiments with phonological similarity had a detrimental effect on recall performance (Mora & Camos, 2015; Tam et al., 2010), rhyming effects were at odds with previous findings. Indeed, while previous studies supported the idea of a facilitating rhyming effect (e.g. Copeland & Radvansky, 2001; Fournet et al., 2003; Macnamara et al., 2011), this study showed a detrimental effect. However this result was in line with other studies (e.g., Fallon et al., 1999; Tehan et al., 2001).

Moreover, as noted by even if no interaction appeared between refreshing and rehearsal in children when both mechanisms were impeded, we still had a phonological similarity effect. Contrary to Mora and Camos (2015), we found this pattern in 6- and 7-year-old children but not in 8-year-old. In this experiment the concurrent task was performed either silently or aloud whereas in Mora and Camos (2015) design, they had to perform a supplementary articulation in addition to the concurrent task. This stronger attentional demand in this previous experiment can explain why they found this pattern in older children and we found this pattern in children younger than 7. As, Mora and Camos (2015) explained it also could be the fact that younger children favour the use of rehearsal. Indeed, 6- and 7-year-old children were impeded by phonological similarity effect even in articulatory suppression condition. Whereas older children can be flexible and using attentional refreshing in articulatory suppression condition, younger children seems to be not flexible. They could

favour rehearsal because it requires less attention and they cannot be flexible in using both mechanisms.

IV.2. EXPERIMENT 2

The aim of Experiment 2 was to examine the same question using another phonological-based effect, i.e., the word length effect. This exploration was first to examine the age-related evolution of the word length effect using a working memory paradigm.

IV.2.1. METHOD

Participants

One hundred and thirty one children participated to the experiment. The sample comprised 46-kindergarteners (24 girls, 22 boys, mean age = 6 years 3 months, $SD = 6$ months), 44-first graders (19 girls, 25 boys, mean age = 7 years 2 months, $SD = 7$ months), and 41-second graders (20 girls, 21 boys, mean age = 8 years 5 months, $SD = 8$ months). All participants were recruited from schools in Switzerland, French native speakers, and none of children had difficulties with perceiving colors. All procedures were performed in accordance with the local authorities, and with consent from the children's carers. The children who participated in Experiment 2 did not participated to Experiment 1.

Materials and Procedure

The second experiment used the same design as in Experiment 1, except children had to maintain different lists of words. All word frequencies in French were between 170 and 1110 and had an AoA below 74.5 months according to *Lexique 3* (New et al., 2001). Two sets of 27 lists of three words per list were created. One set was composed of short monosyllabic words with three phonemes and a mean frequency of 319.61 ($SD = 466.70$). The other set was composed of long bisyllabic words with five phonemes and a mean frequency of 319.66 ($SD = 201.17$). These 54 lists were split into three groups corresponding to the three conditions (i.e., simple span, simple reaction time and choice reaction time). In each group three lists of short words and three lists of long words were randomly presented.

IV.2.2. RESULTS

We first identified and removed from the data of children who showed performance lower than 50% to at least one of the two concurrent tasks to avoid trade-off between memory task and concurrent task. Data from 6 children were removed, 5-kindergardeners and 1-first grader, yielding data set of 125 children with a correct mean response rate of 92% ($SD = 10$).

Analyses of the concurrent task

As in Experiment 1, performance in the concurrent tasks was first analyzed. A $3 \times 2 \times 2$ mixed factorial analysis of variance (ANOVA) was performed on the percentage of correct responses. This analysis was conducted with age (6, 7 and 8 years) and type of responses (keyed vs. aloud) as between-subjects factors and concurrent task (Color discrimination vs. Simple reaction time) as a within-subjects factor. This ANOVA revealed increased percentage of correct responses with age, $F(2, 119) = 7.10$, $p < .001$, $\eta_p^2 = 0.11$. Percentage was 89 ($SD = 11$) at 6, 92 ($SD = 10$) at 7 and 94 ($SD = 7$) at 8. Percentage of correct responses was higher when children had to response aloud (93%, $SD = 8$) than when only pressing keys (90%, $SD = 10$), $F(1, 119) = 4.83$, $p = .03$, $\eta_p^2 = .04$. Finally, percentage of correct responses was lower during complex reaction time task ($M = 89$, $SD = 9$) than simple reaction time task ($M = 94$, $SD = 10$), $F(1, 119) = 22.43$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .16$. The type of task interacted with concurrent articulation, $F(1, 119) = 4.28$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .04$, with an effect of concurrent articulation in color discrimination task, with a loss of 5% and no effect in simple span task. Moreover, the type of task failed to interact with age, with higher difference between color discrimination and simple span tasks at 6 (8%) than at 7 and 8, with 3% and 4%, respectively. No interaction emerged between concurrent articulation and the age ($F < 1$) as well as the 3-way interaction was not significant, $F < 1$.

A similar $3 \times 2 \times 2$ mixed factorial ANOVA was performed on response times. We observed a decreased of response times with age, $F(2, 119) = 14.03$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .19$. Eight-year-old children (849 ms, $SD = 144$) were faster than 7-year olds (931 ms, $SD = 159$) and faster than 6-year olds (993 ms, $SD = 150$). As expected, children were significantly slower in color discrimination (1094 ms, $SD = 161$) than in simple reaction time task (755 ms, $SD = 162$), $F(1, 119) = 521.61$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .81$. Children were slower when they had to respond aloud (952 ms, $SD = 174$) than when only pressing keys (898 ms,

$SD = 141$), $F(1, 119) = 5.70$, $p < .02$, $\eta_p^2 = .05$. This effect interacted with tasks with an increase of 100 ms under concurrent articulation in color discrimination condition and no difference in simple reaction time task condition, $F(1, 119) = 9.40$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .07$. No other interaction was significant, $ps > .18$.

Word length effect in the simple span task

A 3 x 2 x 2 mixed factorial ANOVA was performed on percentage of correct recall during simple span task. This analysis was conducted with age (6, 7 and 8 years) and type of responses (keyed vs. aloud) as between-subjects factors and they type of words (short vs. long) as a within-subjects factor. This analysis revealed that the age effect just failed to reach significance, $F(2, 119) = 2.65$, $p = .08$. The word length effect, the interaction between word length and concurrent articulation, and the interaction between concurrent articulation and age were not significant, $F_s < 1$. Moreover, concurrent articulation had no impact on recall ($F(1, 119) = 2.05$, $p = .16$). No interaction emerged between word length and age ($F(2, 119) = 1.67$, $p = .19$), and the 3-way interaction was not significant ($F(2, 119) = 2.27$, $p = .11$).

As in Experience 1, we performed ANOVA in each age group to examine the age-related changes in the effect of the concurrent articulation and the type of words. In simple span task, concurrent articulation had no effect on recall performance whatever the age, $F(1, 39) = 1.18$, $p = .28$, $F(1, 41) = 1.66$, $p = .21$ and $F < 1$, at 6, 7 and 8, respectively. Word length effect had no significant effect, whatever the age, with at 6 and 8, $F_s < 1$ and at 7, $F(1, 41) = 2.35$, $p = .13$. No interaction emerged between concurrent articulation and the age, with at 6, 7 and 8, $F(1, 39) = 2.41$, $p = .13$, $F < 1$ and $F(1, 39) = 2.10$, $p = .16$, respectively.

Percentages of recall analyse in complex span tasks

Finally, a 3 (age: 6, 7, 8) x 2 (concurrent articulation: silent, aloud) x 2 (concurrent task: color discrimination, simple reaction time) x 2 (word type: short, long) mixed factorial ANOVA was performed on the percentage of correct recall (see Figure IV-2).

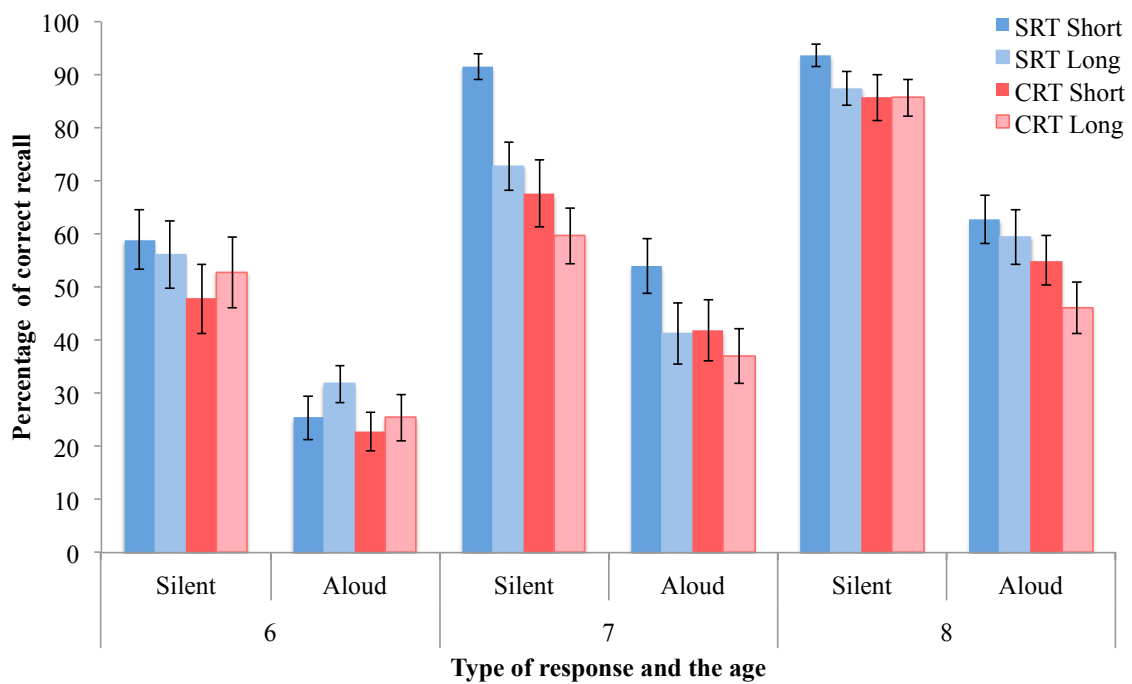


Figure IV-2 : Percentage of correct recall according to the type of tasks [SRT (Simple Reaction Time) vs. CRT (Choice Reaction Time)], the type of word (short vs. long), the type of responses (keyed vs. oral) and the age.

As in the first experiment, recall performance significantly increased with age $F(2, 119) = 37.63, p < .0001, \eta_p^2 = .39$ and pairwise comparisons indicated that all of the differences between age groups were significant ($ps < .001$). Concurrent articulation had a detrimental effect on recall performance, with 42% ($SD = 25$) in the aloud condition and 72% ($SD = 27$) in the silent condition, $F(1, 119) = 99.30, p < .0001, \eta_p^2 = .46$. The type of task had an effect on recall performance, with poorer recall during the choice reaction time task ($M = 52\%, SD = 30$) than during simple reaction time task ($M = 61\%, SD = 29$), $F(1, 119) = 33.84, p < .0001, \eta_p^2 = .22$. Word length had a detrimental effect on recall, with 59% ($SD = 31$) for short words as compared to 55% ($SD = 29$) for long words, $F(1, 119) = 7.52, p < .01, \eta_p^2 = .06$. This word length effect significantly interacted with age, $F(2, 119) = 6.61, p < .01, \eta_p^2 = .10$. Indeed, 6-year-old children did not exhibit a word length effect whereas word length impeded recall of children older than 7, with a decrease of 9% at 7 and 6% at 8. No other interaction was significant, $F_s < 1$.

As in the first experiment, we performed ANOVA in each age group. Whatever the age, concurrent articulation had a detrimental effect on recall performance, $F(1, 39) = 22.30, p < .001, \eta_p^2 = .36, F(1, 41) = 30.15, p < .001, \eta_p^2 = .42$ and $F(1, 39) = 60.61, p < .001,$

$\eta_p^2 = .61$, at 6, 7 and 8, respectively. Recall performance decreased between low- and high-demanding tasks, for all age groups, $F(1, 39) = 5.49$, $p < .03$, $\eta_p^2 = .12$, $F(1, 41) = 21.95$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .35$ and $F(1, 39) = 8.60$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .18$, at 6, 7 and 8, respectively. Word length effect impeded recall in children older than 7, $F(1, 41) = 13.21$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .24$ and $F(1, 39) = 4.28$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .10$, at 7 and 8 respectively, whereas 6-year-old children were not affected by word length effect, $F(1, 39) = 1.05$, $p = .31$, $\eta_p^2 = .03$. Whatever the age, no interaction appeared between the type of task and concurrent articulation or between word length and concurrent articulation or between the type of task and word length as well as the 3-way interaction, was not significant, $ps > .10$.

Indeed, interactions between the type of task and concurrent articulation was not significant at 6 and 8, with $F < 1$ and $F(1, 39) = 1.22$, $p = .28$, respectively and failed to be significant at 7, $F(1, 41) = 3.24$, $p = .08$. Interaction between word length and concurrent articulation was not significant whatever the age, $F_s < 1$. The type of task and word length was not significant, with at 6 and 8, $F_s < 1$ and at 7, $F(1, 41) = 2.77$, $p = .10$. The 3-way interaction was not significant, $F(1, 39) = 1.19$, $p = .28$, $F_s < 1$ and $F(1, 39) = 1.63$, $p = .21$, at 6, 7 and 8, respectively.

IV.2.3. DISCUSSION

The second experiment aimed to examine the same question as Experiment 1 using another phonological effect, the word length effect. This study was the first to examine age-related evolution of the word length effect with a working memory paradigm. As expected, recall performance of all children was impeded by concurrent articulation and there was no interaction between articulatory rehearsal (i.e., concurrent articulation) and attentional refreshing (i.e., simple vs. choice reaction time tasks). These results provide further evidence that articulatory rehearsal and attentional refreshing are two independent mechanisms in children as in adults. Furthermore, the availability of articulatory rehearsal in children before 7-years-old was also supported. Concerning the type of task, the high demanding task led to a reduction of recall performance independent of the age of our participants, even at 6 years of age. This point will be further discussed in the General Discussion. While there was no significant effect of word length in the simple span task, the results indicated that the word length of the memoranda impeded recall in children older than 7 in the complex span task. This seems to suggest that children begin to use articulatory rehearsal at around 7-years of

age. However, 6-year-old children were impeded by concurrent articulation in complex span task, indicating that they do in fact use this mechanism. Thus, the word length effect may not be a proper index to indicate the emergence of the use of articulatory rehearsal as Jarrold and Citroen (2013) propose concerning the phonological similarity effect.

IV.3. GENERAL DISCUSSION

The present study focused on the impact of the phonological characteristics of memoranda during the development of maintenance mechanisms of verbal information in children aged 6 to 8. Only two studies have previously investigated this impact in children (Mora & Camos, 2015; Tam et al., 2010). However, both investigated the impact of the phonological similarity effect using only the Brown-Peterson paradigm or the complex span paradigm. Moreover, Tam et al. (2010) impeded either both refreshing and rehearsal with a verbal concurrent task or only refreshing with a non-verbal concurrent task, whereas Mora and Camos (2015) used a fully crossed design. However, Mora and Camos (2015) centered their exploration on 8-year-old children without considering the potential developmental changes of these mechanisms. The present study investigated the phonological similarity effect, rhyming effect and word length effect using a fully crossed design to vary the availability of both mechanisms in children aged 6 to 8.

As previous studies regarding the development of maintenance mechanisms have also shown, the current study confirmed the independence of these mechanisms (Mora & Camos, 2015). Indeed, there was no interaction between the mechanisms in recall from the working memory span task. However, whereas the results concerning rehearsal were in line with recent findings, the results for refreshing differed. These two points are first considered, and subsequently the effects of the phonological characteristics are further discussed. First, the impediment of recall under concurrent articulation even at 6 years old reinforced the findings of previous experiments showing the use of rehearsal before 7 (e.g., Tam et al., 2010). Indeed, the results of Tam and colleagues and the present study congruently provided a clear impact of articulatory rehearsal on children's recall. Thus, children younger than 7 years old can use articulatory rehearsal. However, the effect of concurrent articulation did marginally interact with age in Experiment 1, thus suggesting that while 6 year olds do use rehearsal, its use may become stronger with increased age.

Secondly, concerning the use of attentional refreshing, our results were in line with previous studies concerning children older than 7 (Tam et al., 2010). Indeed, varying the availability of attention affected recall performance in older children when comparing low- and high-demanding tasks (i.e., simple vs. choice reaction time tasks). This result confirmed that children older than 7 can also use attentional refreshing. Contrary to previous experiments, however, there was no significant interaction between this manipulation of attention available and age. However, ANOVA in each age group revealed that the manipulation of attention had an impact only in children older than 7 for the first experiment and for all age groups in the second experiment. This absence of the effect in younger children reinforced previous findings (Barrouillet et al., 2009; Camos & Barrouillet, 2011) showing a use of refreshing beginning at 7. However, Experiment 2 showed that 6-year-old children were impeded by the manipulation of the availability of attention. Consequently, attention may be utilized in children before 7, but the use of attentional refreshing was probably not very efficient.

Concerning phonological characteristics, the first experiment investigated the phonological similarity and rhyming effects whereas Experiment 2 investigated the word length effect. The pattern of results was not the same between the effects. Whereas lists of rhyming words never impeded recall during complex span tasks, lists of phonologically similar words impeded recall regardless of the age of the child. Moreover, phonological similarity impeded the recall of 8-year-old children only when articulatory rehearsal was available. This result suggests that older children could begin to adapt the use of one or the other mechanism to maintain verbal information. This result was also in line with previous experiments showing an improvement of the use of articulatory rehearsal with age (Jarrold & Citroen, 2013; Tam et al., 2010). The phonological similarity effect impeding recall of 6-year-old children was at odds with the hypothesis of qualitative change about 7 years of age. Concerning rhyming effects, this study was the first exploration in complex span task in children. This effect was not significant in a complex span task even though the effect was replicated in this experiment as in previous experiments using a simple span task (Hall et al., 1983; Hasselhorn & Grube, 2003).

The second experiment was the first exploration of the age-related evolution of the word length effect with the manipulation of maintenance mechanisms in a crossed design. In his thesis, Mora (2011) also explored the word length effect with the manipulation of maintenance mechanisms but only in 8-year-old children. In his study, he had failed to

demonstrate an effect of word length even in the simple span task. In the present experiment, manipulating the word length of the memoranda impeded the recall of children older than 7, but did not impact the recall of younger children. Moreover, no interaction appeared between the manipulation of concurrent articulation and the words length. Surprisingly, there was also no significant word length effect in the simple span task.

This surprising lack of the rhyming effect in complex span and the word length effect in simple span could be due to the trial length. Indeed, the present experiments used lists of three words and past research suggested that there may be a three-item floor in 4- to 6-year-old children for phonologically similar items (Hulme, 1984). This minimum number of words to notice these effects could be higher for the rhyming and the words length effects. Consequently our lists of three words could lead to a ceiling effect. Further research should be conducted with lists of four items to avoid this ceiling effect.

This difference in findings regarding the effect of concurrent articulation and word length effect at 6 could also be explained by the possibility that the word length effect may not be a proper index to indicate the emergence of the use of articulatory rehearsal. Consequently, this proposition of Jarrold and Citroen (2013) concerning the phonological similarity effect as a wrong indicator of developmental changes in rehearsal could be extended to all phonological effects, like the word length effect. Furthermore, as suggested by Jalbert, Neath, Bireta, and Surprenant (2011), past research has shown better recall of short words than long words because the former had more orthographic neighbors than the latter. In Experiment 3, Jalbert, Neath, and Surprenant (2011) factorially manipulated word length and neighborhood size. These authors found only the effect of neighborhood size without word length effect. The importance of lexical and linguistic factors was also reinforced by the study of word frequency. In adults, the effect of word frequency in short-term memory tasks is well known, with better recall for high frequency words than low frequency words (Hulme et al., 1997; Poirier & Saint-Aubin, 2003; Roodenrys, Hulme, Alban, Ellis, & Brown, 1994; Saint-Aubin & LeBlanc, 2005; Saint-Aubin & Poirier, 2005). In the present experiment, frequency was controlled for between lists of short and long words; nevertheless neighborhood size was not controlled. Whereas short words had an average of 9.06 orthographic and 19.23 phonological neighbors, long words had an average of 1.55 orthographic and 3.13 phonological neighbors, and thus short and long words strongly differed in these respects, $ps < .0001$. Thus, the present results could instead indicate an effect of orthographic or phonological neighbors emerging at 7 years of age rather than the emergence of the use of

articulatory rehearsal per se. Thus, although they were both intended to manipulate rehearsal, the null interaction between the word length effect and concurrent articulation could be due to the possibility that these variables are actually addressing different constructs, i.e., lexical characteristics and rehearsal, respectively. Further studies are needed to distinguish these three different phonological effects and the emergence of articulatory rehearsal. The interaction between the manipulation of rehearsal and of phonological characteristics appeared only for the phonological similarity effect and the manipulation of concurrent articulation in 8-year-old children. Consequently, children could adapt their use of rehearsal to maintain verbal information according to the type of words only above 8 years of age.

To conclude, this study reinforced the independence of articulatory rehearsal and attentional refreshing in the maintenance of verbal information in children. It also showed that articulatory rehearsal was available before 7 years of age and phonological characteristics of memoranda impeded recall in different ways. Moreover the results provide further evidence in favor of the hypothesis of a quantitative change during the development of articulatory rehearsal.

Chapitre V : DISCUSSION GENERALE

Cette thèse avait pour but d'étudier l'évolution développementale des mécanismes de maintien de l'information verbale en mémoire de travail entre 6 et 9 ans. Pour maintenir des informations verbales en mémoire de travail, nous utilisons deux mécanismes : la répétition articulatoire et le rafraîchissement attentionnel (Camos et al., 2009; Camos et al., 2011; Hudjetz & Oberauer, 2007). La répétition articulatoire est un mécanisme spécifique au maintien de l'information verbale, qui nous permet de maintenir les informations sous forme de codes phonologiques en les répétant pour éviter l'oubli. Plusieurs effets nous permettent de prouver l'utilisation de la répétition articulatoire, comme l'effet de similarité phonologique, l'effet de rime et l'effet de la longueur des mots. Ces effets sont le résultat de l'utilisation de codes phonologiques pouvant entraîner par exemple des confusions phonologiques. Le second mécanisme, le rafraîchissement attentionnel, est un mécanisme plus général, basé sur l'attention, permettant de maintenir tout type d'informations sous forme de représentations multimodales. Ce mécanisme permettrait de focaliser notre attention sur les éléments à mémoriser dans le but d'augmenter leur niveau d'activation. Chez l'adulte, ces deux mécanismes sont indépendants et peuvent être utilisés conjointement (Camos et al., 2009). De plus, nous sommes capables de choisir l'un ou l'autre de ces mécanismes en fonction des instructions données, mais aussi en fonction des contraintes de la tâche (Camos et al., 2011).

Chez l'enfant, nous savons qu'au moins à partir de l'âge de 7 ans, les deux mécanismes sont disponibles. Concernant la répétition articulatoire, de récentes études questionnent l'idée d'un changement qualitatif à l'âge de 7 ans et montrent que ce mécanisme pourrait être disponible avant cet âge charnière (Al-Namlah et al., 2006; Henry et al., 2012; Jarrold & Tam, 2011; Tam et al., 2010). Concernant le rafraîchissement attentionnel, peu d'études se sont penchées sur son développement (Barrouillet et al., 2009; Bayliss, Jarrold, Baddeley, & Leigh, 2005; Camos & Barrouillet, 2011; Gavens & Barrouillet, 2004; Mora & Camos, 2015; Portrat, Camos, & Barrouillet, 2009; Tam et al., 2010). Cependant, elles s'accordent toutes sur le fait que l'utilisation du rafraîchissement attentionnel apparaîtrait autour de 7 ans. A cet âge, les enfants passeraient d'un maintien passif des informations à un maintien actif (Barrouillet et al., 2009; Camos & Barrouillet, 2011). L'étude conjointe de ces deux mécanismes chez l'enfant est très rare (Magimairaj & Montgomery, 2012; Mora & Camos, 2015; Tam et al., 2010). Ces études semblent indiquer que ces deux mécanismes sont indépendants chez l'enfant comme ils le sont chez l'adulte. Cependant, seule l'étude de Tam et al. (2010) a étudié l'évolution développementale de ces mécanismes en comparant deux groupes d'âge, des enfants de 6 et de 8 ans. Les résultats de cette étude ont permis de montrer

que les enfants utiliseraient la répétition articulatoire dès l'âge de 6 ans et que cette utilisation deviendrait de plus en plus efficace avec l'âge. Concernant le rafraîchissement attentionnel, d'après Tam et al. (2010), il serait disponible dès 6 ans et son utilisation s'améliorerait entre 6 et 8 ans. Cette thèse avait pour but d'étendre l'exploration de l'évolution conjointe de ces deux mécanismes, et d'apporter plus d'éléments empiriques afin d'examiner l'hypothèse d'un changement qualitatif ou quantitatif du développement de la répétition articulatoire.

Dans ce but, trois études ont été menées sur la répétition articulatoire et le rafraîchissement attentionnel. La première étude (Chapitre II) avait pour but de tester l'utilisation de chacun des mécanismes indépendamment et d'explorer l'interaction potentielle entre ces deux mécanismes lors de tâches d'empan complexe. La deuxième étude (Chapitre III) avait pour but d'explorer l'utilisation des deux mécanismes lors de tâche de Brown-Peterson. Dans la troisième étude (Chapitre IV), nous avons étudié l'impact des caractéristiques phonologiques des items à mémoriser sur le maintien en mémoire de travail en utilisant des tâches d'empan complexe. Nous nous sommes portés sur les effets de similarité phonologique, de rimes et de longueur des mots. L'ensemble de ce travail a permis plusieurs conclusions. Premièrement, ces études soutiennent l'idée de deux mécanismes soutenant le maintien d'informations verbales. Deuxièmement, l'ensemble des études se rejoignent et montrent que ces deux mécanismes sont indépendants chez l'enfant. Troisièmement, l'utilisation de la répétition articulatoire est possible avant l'âge de 7 ans, et l'hypothèse d'un changement qualitatif concernant le maintien des informations verbales est remise en cause.

V.1. Evolution développementale des mécanismes de maintien de l'information verbale en mémoire de travail

V.1.1. Interaction des mécanismes

Dans ce travail, nous avons exploré la potentielle interaction entre les mécanismes de rafraîchissement attentionnel et de répétition articulatoire lors du maintien de l'information verbale en mémoire de travail chez l'enfant. Plus spécifiquement, nous avons fait l'hypothèse d'une indépendance des deux mécanismes chez l'enfant.

La relation entre ces deux mécanismes a été examinée chez des enfants de différents groupes d'âge, grâce à la conception croisée des expériences présentées dans ce travail. En effet, l'ensemble de nos expériences comportait une manipulation de l'utilisation de la répétition articulatoire et du rafraîchissement attentionnel. La répétition articulatoire était entravée par une tâche de suppression articulatoire alors que l'utilisation du rafraîchissement attentionnel était entravée par l'ajout d'une tâche concurrente et/ou par la manipulation du coût attentionnel de cette tâche concurrente. Les précédentes études soutiennent l'idée d'une indépendance des deux mécanismes chez l'enfant (Magimairaj & Montgomery, 2012; Mora & Camos, 2015; Tam et al., 2010). En accord avec ces études, nos résultats n'ont montré aucune interaction entre la manipulation de la disponibilité de la répétition articulatoire ou de celle du rafraîchissement attentionnel. Nos recherches corroborent donc les résultats de Magimairaj & Montgomery (2012) qui montraient que l'utilisation de chaque mécanisme contribuait à une part de variance indépendante et unique chez les enfants. Nos résultats confirment également ceux obtenus par Mora et Camos (2015) sur des enfants de 8 ans. De plus, nos recherches portant sur des enfants âgés de 6 à 9 ans, ont permis d'élargir ces résultats à différents groupes d'âge. Ces résultats, en accord avec les précédentes études conduites chez l'enfant, nous permettent de conforter l'hypothèse d'une indépendance des deux mécanismes dès l'âge de 6 ans. De manière plus étendue, cette absence d'interaction chez l'enfant renforce également l'existence de deux mécanismes permettant le maintien de l'information verbale en mémoire de travail. Ce résultat confirme également la distinction entre la boucle exécutive et la boucle articulatoire du modèle de partage temporel des ressources proposée par Barrouillet et Camos (2015).

V.1.2. Le développement de la répétition articulatoire et du rafraîchissement attentionnel

En plus de la démonstration de l'indépendance des mécanismes de répétition articulatoire et de rafraîchissement attentionnel chez l'enfant, un aspect essentiel de ce travail reposait sur l'exploration du développement de ces mécanismes. Nous présentons ci-après ce développement, en abordant tout d'abord celui de la répétition articulatoire et en discutant l'hypothèse d'un changement qualitatif autour de l'âge de 7 ans, avant d'aborder le développement du rafraîchissement attentionnel.

La répétition articulatoire

Afin d'étudier le développement de la répétition articulatoire, nous avons systématiquement manipulé sa disponibilité, via l'utilisation d'une articulation concurrente, dans l'ensemble des expériences présentées dans cette thèse. L'utilisation d'une articulation concurrente, soit par une tâche spécifique (répétition constante du mot « oui » lors du maintien des informations) soit par une tâche imbriquée (donner la réponse de la tâche concurrente à voix haute), induisait une suppression articulatoire. Si nous nous attendions à ce que le rappel diminue quelle que soit l'articulation concurrente utilisée pour les enfants âgés de 7 ans et plus, nous n'avions pas de prédiction pour les enfants plus jeunes, car l'utilisation de la répétition articulatoire à cet âge-là est controversée dans la littérature. Les résultats des six expériences de ce travail ont montré que, quel que soit l'âge, la suppression articulatoire entraîne une diminution du rappel. Cependant, alors que l'effet de la suppression articulatoire augmentait avec l'âge dans les Expériences 1, 2 et 6, cet effet n'était que tendanciel dans l'Expérience 5 et n'apparaissait pas dans les Expériences 3 et 4. Ces résultats prouvent que les enfants de 6 ans peuvent utiliser la répétition articulatoire et suggèrent que cette utilisation évolue entre 6 et 9 ans, même si cette évolution n'était pas toujours perceptible dans l'ensemble de nos expériences. Ces éléments rejoignent ainsi les observations de mouvements de lèvres sous-tendant l'utilisation de la répétition articulatoire avant l'âge de 7 ans (Al-Namlah et al., 2006; Henry et al., 2012; Jarrold & Tam, 2011; Tam et al., 2010).

Par conséquent, l'hypothèse soutenant l'idée d'un changement qualitatif du maintien de l'information à l'âge de 7 ans n'est pas soutenue par nos résultats. En d'autres mots, il ne semble pas y avoir de passage d'un maintien purement visuel pour les enfants de moins de 7 ans à un maintien verbal après 7 ans. Toutefois, nos résultats n'excluent pas qu'un

changement qualitatif pourrait apparaître plus tôt dans le développement. Ces résultats sont en continuité avec les résultats obtenus par Henry et al. (2012) montrant un codage visuel et phonologique d'images à mémoriser chez les enfants de 4 ans et un codage exclusivement phonologique autour de 5-6 ans. Dans le but d'analyser de façon plus approfondie l'utilisation de la répétition articulatoire, nous avons analysé dans la troisième étude l'impact des caractéristiques phonologiques des items à mémoriser pouvant mettre en évidence l'utilisation de la répétition articulatoire. Dans un premier temps, nous aborderons les effets de similarité phonologique et de rime et dans un deuxième temps, l'effet de longueur des mots et l'effet de suppression articulatoire.

Effet de similarité phonologique et effet de rime

Pour les enfants ayant à disposition l'utilisation des mécanismes de répétition articulatoire et de rafraîchissement attentionnel, donc les enfants de plus de 7 ans, nous supposons que les effets de similarité phonologique et de rime seraient présents uniquement lorsque la répétition articulatoire était le seul mécanisme disponible. Les effets de similarité phonologique et de rime seraient donc présents uniquement lorsque la tâche concurrente demande beaucoup d'attention mais ne comporte pas de suppression articulatoire. Avant l'âge de 7 ans, le rafraîchissement attentionnel ne pourrait pas être utilisé et seule l'utilisation de la répétition articulatoire serait disponible. Par conséquent, nous supposons que les effets de similarité phonologique et de rime seraient présents lorsque la répétition articulatoire était disponible quelle que soit la manipulation du rafraîchissement attentionnel. Les résultats obtenus montrent un effet de similarité phonologique chez les enfants de 6 ans et une interaction entre l'effet de similarité phonologique et l'effet de l'articulation concurrente uniquement pour le groupe le plus âgé, celui des 8 ans. En effet, les enfants de 8 ans étaient sensibles à l'effet de similarité phonologique uniquement lorsque la répétition articulatoire était disponible. Compte tenu de ces résultats, nous pouvons supposer que les enfants de 8 ans peuvent changer de stratégie en fonction des contraintes de la tâche mais pas les enfants plus jeunes. Bien que les enfants de 6 ans ne semblent pas pouvoir s'adapter aux contraintes de la tâche, la présence de l'effet de similarité phonologique nous laisse supposer qu'ils maintiennent les informations à l'aide de codes phonologiques.

Concernant l'effet de rime, les listes de mots dissimilaires étaient mieux rappelées que les listes de mots rimant lors de tâche d'empan simple. Ce résultat va dans le sens des études

rapportant un effet défavorable des rimes lors de tâches d'empan simple à la fois chez l'adulte (voir Gupta et al., 2005, pour une méta-analyse) et chez l'enfant (Hall et al., 1983; Hasselhorn & Grube, 2003). L'effet de rime a été peu étudié lors de tâches d'empan complexe (e.g., Copeland & Radvansky, 2001; Fournet et al., 2003) et les auteurs reportent un effet facilitateur des rimes chez l'adulte. Chez l'enfant, nous n'avons trouvé aucune étude reportant un effet facilitateur ou délétère lors de tâche d'empan complexe. Seul Mora (2013) s'est intéressé à l'effet de rime chez l'enfant lors de tâche d'empan complexe et il n'a reporté aucun effet des rimes chez les enfants de 8 ans. L'Expérience 5 de ce travail a permis de compléter l'étude de Mora (2013) chez des enfants de 6 à 8 ans. Les résultats obtenus ne montrent aucun effet significatif des rimes lors de tâches d'empan complexe, quel que soit l'âge des enfants. L'effet de rime n'est peut-être pas l'indice le plus fiable pour justifier la présence de stockage phonologique. Cependant, l'utilisation de l'effet de similarité phonologique nous a permis de mettre en avant la présence d'un stockage phonologique dès l'âge de 6 ans. Cette présence dès l'âge de 6 ans questionne l'hypothèse d'un changement qualitatif de l'utilisation de la répétition articulatoire à l'âge de 7 ans. Afin de déterminer si l'émergence de la répétition articulatoire se fait dès 6 ans, nous avons étudié deux autres indices, l'effet de longueur des mots et l'effet de suppression articulatoire.

Effet de suppression articulatoire et de longueur des mots

L'effet de suppression articulatoire a été utilisé dans l'ensemble des six expériences présentées dans cette thèse. Nous supposons que lorsqu'une articulation concurrente était ajoutée pendant le maintien des items, leur rappel serait diminué et ce, quelle que soit l'articulation concurrente. En accord avec ces prédictions, le rappel des items à mémoriser chutait drastiquement lors de la présence d'une suppression articulatoire dès l'âge de 6 ans ; ceci apportant une preuve supplémentaire concernant l'utilisation de la répétition articulatoire avant l'âge de 7 ans.

Concernant l'effet de la longueur des mots, notre étude était la première à étudier cet effet chez l'enfant lors de tâches d'empan complexe. Les résultats ont montré une apparition de l'effet de longueur des mots à l'âge de 7 ans. L'absence d'effet à l'âge de 6 ans pourrait nous amener à dire que la répétition articulatoire n'est pas utilisée avant 7 ans. Or, nous venons de montrer avec l'effet de l'articulation concurrente que les enfants de 6 ans utilisent la répétition articulatoire. Nous pouvons donc supposer que cet effet de longueur des mots

était trop faible chez les enfants de 6 ans pour apparaître dans nos résultats. La manipulation des caractéristiques phonologiques et de la suppression articulatoire nous a donc permis de conforter l'idée de l'utilisation de codes phonologiques et de l'utilisation du mécanisme de répétition articulatoire dès l'âge de 6 ans.

Le rafraîchissement attentionnel

Nous avons pu montrer l'utilisation du mécanisme de répétition articulatoire dès l'âge de 6 ans. Concernant l'utilisation du rafraîchissement attentionnel, les précédentes études sont toutes congruentes concernant un changement de l'utilisation de ce mécanisme autour de l'âge de 7 ans. Cependant, elles étaient peu nombreuses (Barrouillet et al., 2009; Camos & Barrouillet, 2011; Gavens & Barrouillet, 2004; Mora & Camos, 2015; Portrat et al., 2009) et seules deux de ces études ont porté sur une comparaison entre des enfants âgés de plus ou moins de 7 ans (Barrouillet et al., 2009; Camos & Barrouillet, 2011). Pour les enfants de plus de 7 ans, les résultats de Barrouillet et al. (2009) et Camos et Barrouillet (2011) montrent une réduction du rappel lors de l'augmentation de la demande attentionnelle de la tâche concurrente. A l'inverse, le rappel des enfants plus jeunes n'était pas affecté par la variation du coût attentionnel de la tâche concurrente. Les résultats de l'ensemble des expériences de cette thèse rejoignent les études de Barrouillet et al. (2009) et Camos et Barrouillet (2011), reportant une utilisation du mécanisme de rafraîchissement attentionnel à partir de l'âge de 7 ans. Dans les six expériences de ce travail, l'utilisation du rafraîchissement attentionnel a été principalement manipulée par la variation de la demande attentionnelle de la tâche concurrente. De plus, lors des Expériences 3 et 4 (Chapitre III), cette manipulation se faisait également par l'ajout d'une tâche qui demandait de l'attention, entre l'encodage des items et leur rappel. Nous discuterons de cette manipulation dans la prochaine partie. Concernant la variation de la demande attentionnelle, l'augmentation de cette demande a entraîné une diminution du rappel et l'impact de la variation de la demande attentionnelle augmentait avec l'âge. La diminution du rappel avec l'augmentation de la demande attentionnelle était présente dans l'ensemble des études pour les enfants âgés d'au moins 7 ans. A l'inverse, l'impact de la demande attentionnelle pour les enfants de 6 ans n'était pas constant entre les études. Les Expériences 1 et 4 ne reportent aucun impact de la variation de la demande attentionnelle alors que les résultats des Expériences 2 et 6 montrent que cette variation affecte le rappel des enfants de 6 ans. Dans l'Expérience 1, les enfants devaient effectuer une

tâche de discrimination de couleur demandant peu d'attention et une tâche de catégorisation demandant plus d'attention. Dans l'Expérience 4, les enfants devaient effectuer une tâche avec un coût cognitif faible, le jugement de la couleur d'un smiley lors d'une période de quatre secondes ou une tâche avec un coût cognitif plus élevé, le jugement de la couleur de deux smileys pendant la même durée de quatre secondes. Contrairement aux résultats des Expériences 1 et 4, l'effet de la variation de la demande attentionnelle était significatif lors des Expériences 2 et 6. Lors des Expériences 2 et 6, la variation attentionnelle résultait de la comparaison entre une tâche de réaction simple (appuyer sur une touche dès qu'une image représentant un animal apparaît à l'écran) et une tâche de choix forcé qui était une tâche de discrimination de couleur. La différence de résultats entre ces deux groupes d'expériences est probablement due aux tâches de réaction simple qui demanderaient trop peu d'attention. Les tâches de réaction simple n'entraveraient pas l'utilisation du rafraîchissement attentionnel contrairement aux tâches de discrimination de couleur et de jugement de la couleur d'un smiley qui devaient demander suffisamment d'attention pour entraver le mécanisme de rafraîchissement attentionnel. Ces résultats suggèrent une implication de l'attention lors du maintien d'information verbale chez les enfants de 6 ans. Cependant, comme la variation du coût attentionnel n'a pas d'impact chez les enfants de 6 ans et que plusieurs études reportent le fait que les enfants de 6 ans n'utilisent pas le rafraîchissement attentionnel (Barrouillet et al., 2009; Camos & Barrouillet, 2011) nous ne pouvons pas conclure que les enfants de 6 ans utilisent le rafraîchissement attentionnel. A l'aide de la deuxième étude (Chapitre III), nous allons essayer de comprendre si la perte d'activation des éléments à maintenir en mémoire chez les enfants les plus jeunes est le résultat d'un déclin temporel ou celui de la manipulation de la disponibilité du mécanisme de rafraîchissement attentionnel.

V.1.3. Impact de l'introduction d'un délai et d'une tâche secondaire

Nous venons de voir l'impact de la variation de la demande attentionnelle de la tâche concurrente et allons maintenant aborder l'impact de l'ajout d'un délai entre la présentation des items à maintenir et leur rappel. Nous aborderons également l'impact de l'ajout d'une tâche nécessitant de l'attention pendant ce délai. D'après le modèle du TBRS, lors de l'ajout d'un délai vide, si aucun mécanisme n'est utilisé pour réactiver les traces présentes en mémoire, l'activation de ces traces décline avec le temps. C'est le résultat obtenu par Bertrand et Camos (2015) avec des enfants de 4 à 6 ans. Lors de cette étude, des fruits en plastique

étaient placés par l'expérimentateur l'un après l'autre dans un sac transparent. Les enfants devaient reproduire la série de fruits en les introduisant dans l'ordre dans leur propre sac plastique. Le rappel était effectué soit immédiatement, soit après un délai. L'introduction d'un délai induisait une diminution du rappel quel que soit l'âge des enfants. Les enfants de 4 à 6 ans ne seraient donc pas capables de mettre en place des mécanismes pour réactiver les traces en mémoire. Les résultats des Expériences 3 et 4 sont en continuité avec ceux de Bertrand et Camos (2015) montrant que les enfants de 6 ans ne sont pas affectés par l'introduction d'un délai vide. De plus, les enfants de 7 et 8 ans montrent une amélioration du rappel lors de l'introduction de ce délai. Nous pouvons donc supposer que les enfants de moins de 6 ans n'utilisent pas de stratégie active pour maintenir l'information verbale, mais qu'ils utilisent un maintien passif. A 6 ans, les enfants commencent à mettre en place des stratégies de maintien de l'information verbale et l'utilisation de ces stratégies est de plus en plus efficace avec l'âge. Contrairement aux précédentes études proposant un changement qualitatif du maintien des informations verbales à l'âge de 7 ans (Gathercole, 1998; Gathercole & Adams, 1994; Henry, 1991), l'émergence du maintien actif des informations verbales se ferait de façon plus progressive et plus tôt. Compte tenu de l'ensemble de nos résultats, nous supposons un développement plus graduel avec l'utilisation de stratégies actives dès l'âge de 6 ans. Le rafraîchissement attentionnel pourrait être utilisé dès l'âge de 7 ans et la répétition articulatoire dès l'âge de 6 ans. Cependant à 6 ans, l'utilisation de la répétition articulatoire ne serait pas encore très efficace et des études complémentaires plus ciblées sur les capacités d'adaptation seraient nécessaires.

V.2. Conclusion

Ce travail de thèse a permis de confirmer la distinction de deux mécanismes mis en jeu lors du maintien d'informations verbales et de comprendre leur évolution développementale. Ces deux mécanismes sont distincts dès l'enfance et leur fonctionnement respectif est indépendant. Alors que la répétition articulatoire serait disponible dès 6 ans, l'émergence du rafraîchissement attentionnel est moins précise. En effet, même si l'attention joue un rôle avant l'âge de 7 ans, les preuves de l'utilisation du rafraîchissement attentionnel n'apparaissent qu'à l'âge de 7 ans. Il serait intéressant dans le futur de tester les stratégies utilisées par les enfants autour de l'âge de 7 ans. Ceci pourrait se faire par exemple, en

donnant des consignes poussant les enfants à l'utilisation de l'un ou l'autre des mécanismes, comme dans l'étude menée chez l'adulte de Camos, Mora, et Oberauer (2011).

Comme Loaiza et McCabe (2012, 2013) ont montré que chez l'adulte, l'utilisation de l'un ou l'autre de ces mécanismes lors du maintien en mémoire de travail peut avoir un impact sur le rappel à long terme, il serait intéressant de voir cet impact chez l'enfant. Est-ce que, comme chez l'adulte, le maintien des informations verbales à l'aide du rafraîchissement attentionnel serait plus persistant en mémoire à long terme que lors du maintien via la répétition articulatoire ? Nous avons testé cette hypothèse en variant de manière orthogonale la disponibilité des deux mécanismes lors de tâches de mémoire de travail. Les enfants de 6 à 8 ans devaient mémoriser des animaux présentés visuellement et auditivement. Pour tester le rappel en mémoire à long terme, nous interrogeons les enfants suite à un délai d'une minute. Pendant ce délai, les enfants devaient visionner un court dessin animé. Le rappel était libre et les enfants devaient rappeler le plus d'animaux possible. Comme les enfants ont rencontré beaucoup de difficultés lors du rappel libre, nous avons reconduit la même expérience avec un test de reconnaissance pour évaluer le maintien en mémoire à long terme. Les enfants devaient retrouver huit noms d'animaux qu'ils avaient déjà entendus dans l'expérience parmi les 16 présentés auditivement. Comme les scores étaient toujours très faibles, l'impact de la variation des mécanismes lors de tâche de mémoire de travail sur le rappel à long terme n'était pas mesurable. Il serait intéressant de reconduire des études similaires pour connaître cet impact potentiel, en réduisant le délai précédant le rappel à long terme et en présentant les items auditivement et visuellement lors de la tâche de reconnaissance.

Il serait aussi intéressant d'entraîner les enfants à utiliser plus tôt ou avec plus d'efficacité le rafraîchissement attentionnel. Cependant, les études portant sur l'entraînement de la mémoire de travail ont des résultats contradictoires tant chez l'adulte que chez l'enfant (Karbach & Unger, 2014; Karbach & Verhaeghen, 2014; Lampit, Hallock, & Valenzuela, 2014; Melby-Lervag & Hulme, 2013; Titz & Karbach, 2014). De nombreuses études reportent des effets positifs des entraînements sur les capacités cognitives comme la mémoire de travail, alors que d'autres ne révèlent aucun transfert. Chez l'enfant, les études se sont principalement centrées sur l'entraînement des fonctions exécutives.

Des recherches complémentaires pourraient également porter sur l'utilisation de la consolidation chez les enfants. La consolidation permettrait de transformer des entrées sensorielles sous une forme plus durable, c'est-à-dire de renforcer les traces perceptives pour les maintenir plus longtemps (Jolicoeur & Dell'Acqua, 1998). Dans l'étude de Bayliss,

Bogdanovs, and Jarrold (2015), les auteurs démontrent que la possibilité de consolider immédiatement après la présentation de chaque élément à mémoriser entraîne de meilleures performances de rappel lors de tâches de mémoire de travail. De plus, cet effet est indépendant de la difficulté de la tâche concurrente et de la suppression articulatoire. Les auteurs en concluent que la consolidation est un mécanisme différent du rafraîchissement attentionnel et de la répétition articulatoire. Nous avons testé cette hypothèse sur des enfants âgés de 5 et 6 ans. Lors de cette étude, les enfants devaient maintenir le nom d'animaux présentés auditivement et visuellement. Pendant le maintien, ils devaient soit effectuer une tâche de catégorisation, soit une tâche de discrimination de couleur, soit ils n'avaient aucune autre tâche spécifique à effectuer. Lors de la tâche de catégorisation, les enfants devaient dire si l'animal était un animal du zoo ou de la ferme et lors de la tâche de discrimination de couleur, ils devaient dire si l'image était en couleur ou en noir et blanc. Nous supposons que les tâches de catégorisation ou de discrimination de couleur devaient aider les enfants à consolider les traces, or nos résultats ont révélé un effet délétère de l'introduction des tâches, indépendamment du type de tâche. Ces tâches devaient probablement être trop coûteuses en attention sans pouvoir aider la consolidation. Il serait intéressant d'effectuer la même étude sur des enfants plus âgés dans le but d'investiguer la possible présence d'un troisième mécanisme permettant le maintien de l'information verbale.

BIBLIOGRAPHIE

- Al-Namlah, A. S., Fernyhough, C., & Meins, E. (2006). Sociocultural influences on the development of verbal mediation: Private speech and phonological recoding in Saudi Arabian and British samples. *Developmental Psychology, 42*(1), 117-131.
- Allik, J. P., & Siegel, A. W. (1976). Use of Cumulative Rehearsal Strategy - Developmental-Study. *Journal of experimental child psychology, 21*(2), 316-327.
- Alloway, T. P., Gathercole, S. E., Willis, C., & Adams, A. M. (2004). A structural analysis of working memory and related cognitive skills in young children. *Journal of experimental child psychology, 87*(2), 85-106.
- Anderson, J. R., Bothell, D., Byrne, M. D., Douglass, S., Lebiere, C., & Qin, Y. L. (2004). An integrated theory of the mind. *Psychological review, 111*(4), 1036-1060.
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. *Psychology of learning and motivation, 2*, 89-195.
- Baddeley, A. (1966). The influence of acoustic and semantic similarity on long-term memory for word sequences. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 18*(4), 302-309.
- Baddeley, A. (1986). *Working memory*: Oxford: Oxford University Press.
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences, 4*(11), 417-423.
- Baddeley, A. (2003). Working memory: Looking back and looking forward. *Nature Reviews Neuroscience, 4*(10), 829-839.
- Baddeley, A. (2007). *Working memory, thought, and action*. New York: Oxford University Press.
- Baddeley, A. (2012). Working Memory: Theories, Models, and Controversies. *Annual Review of Psychology, Vol 63, 63*, 1-29.
- Baddeley, A., Chincotta, D., Stafford, L., & Turk, D. (2002). Is the word length effect in STM entirely attributable to output delay? Evidence from serial recognition. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section a-Human Experimental Psychology, 55*(2), 353-369.
- Baddeley, A., Gathercole, S., & Papagno, C. (1998). The phonological loop as a language learning device. *Psychological review, 105*(1), 158-173.
- Baddeley, A., & Hitch, G. (1974). Working Memory. In G. H. Bower (ed.) *Recent advances in Learning and Motivation Volume 8, Academic Press, New York, 8*, 47-90.

BIBLIOGRAPHIE

- Baddeley, A., Thomson, N., & Buchanan, M. (1975). Word Length and Structure of Short-Term-Memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 14(6), 575-589.
- Barrouillet, P., Bernardin, S., & Camos, V. (2004). Time constraints and resource sharing in adults' working memory spans. *Journal of Experimental Psychology-General*, 133(1), 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., & 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., & Camos, V. (2007a). Le développement de la mémoire de travail. In J. Lautrey (Ed.), *Psychologie du développement et de l'éducation* (pp. 51-86). Paris: PUF.
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2009). Interference: unique source of forgetting in working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 13(4), 145-146.
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2010). Working Memory and Executive Control: A Time-Based Resource-Sharing Account. *Psychologica Belgica*, 50(3-4), 353-382.
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2012). As Time Goes By: Temporal Constraints in Working Memory. *Current Directions in Psychological Science*, 21(6), 413-419.
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2015). *Working memory : loss and reconstruction*. London: Psychology Press.
- 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., Plancher, G., Guida, A., & Camos, V. (2013). Forgetting at short term: When do event-based interference and temporal factors have an effect? *Acta psychologica*, 142(2), 155-167.
- Bayliss, D. M., Bogdanovs, J., & Jarrold, C. (2015). Consolidating working memory: Distinguishing the effects of consolidation, rehearsal and attentional refreshing in a working memory span task. *Journal of Memory and Language*, 81, 34-50.
- Bayliss, D. M., Jarrold, C., Baddeley, A. D., & Leigh, E. (2005). Differential constraints on the working memory and reading abilities of individuals with learning difficulties and typically developing children. *Journal of experimental child psychology*, 92(1), 76-99.

BIBLIOGRAPHIE

- Bertrand, R., & Camos, V. (2015). The role of attention in preschoolers' working memory. *Cognitive Development, 33*, 14-27.
- Brown, J. (1958). Some Tests of the Decay Theory of Immediate Memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 10*(1), 12-21.
- Camos, V., & Barrouillet, P. (2011). Developmental Change in Working Memory Strategies: From Passive Maintenance to Active Refreshing. *Developmental Psychology, 47*(3), 898-904.
- Camos, V., & Barrouillet, P. (2013). Le développement de la mémoire de travail : perspectives dans le cadre du modèle de partage temporel des ressources. *Psychologie Française.*
- Camos, V., & Barrouillet, P. (2014). Attentional and non-attentional systems in the maintenance of verbal information in working memory: the executive and phonological loops. *Frontiers in Human Neuroscience, 8*, 900.
- Camos, V., Lagner, P., & Barrouillet, P. (2009). Two maintenance mechanisms of verbal information in working memory. *Journal of Memory and Language, 61*(3), 457-469.
- Camos, V., Mora, G., & Barrouillet, P. (2013). Phonological similarity effect in complex span task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 66*(10), 1927-1950.
- Camos, V., Mora, G., & Oberauer, K. (2011). Adaptive choice between articulatory rehearsal and attentional refreshing in verbal working memory. *Memory & cognition, 39*(2), 231-244.
- Camos, V., & Portrat, S. (2014). The impact of cognitive load on delayed recall. *Psychonomic Bulletin & Review.*
- Case, R. (1985). *Intellectual development : birth to adulthood*. Orlando ; San Diego etc.: Academic press.
- Case, R., Kurland, M. D., & Goldberg, J. (1982). Operational efficiency and the growth of short-term memory span. *Journal of experimental child psychology, 33*(3), 386-404.
- Chalard, M., Bonin, P., Meot, A., Boyer, B., & Fayol, M. (2003). Objective age-of-acquisition (AoA) norms for a set of 230 object names in French: Relationships with psycholinguistic variables, the English data from Morrison et al. (1997), and naming latencies. *European Journal of Cognitive Psychology, 15*(2), 209-245.
- Chen, Z., & Cowan, N. (2009). How verbal memory loads consume attention. *Memory & cognition, 37*(6), 829-836.

BIBLIOGRAPHIE

- Cohen, J., Macwhinney, B., Flatt, M., & Provost, J. (1993). Psyscope - an Interactive Graphic System for Designing and Controlling Experiments in the Psychology Laboratory Using Macintosh Computers. *Behavior Research Methods Instruments & Computers*, 25(2), 257-271.
- Colle, H. A., & Welsh, A. (1976). Acoustic Masking in Primary Memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 15(1), 17-31.
- Conrad, R., & Hull, A. J. (1964). Information, Acoustic Confusion and Memory Span. *British Journal of Psychology*, 55(4), 429-432.
- Conway, A. R. A., & Engle, R. W. (1994). Working-Memory and Retrieval - a Resource-Dependent Inhibition Model. *Journal of Experimental Psychology-General*, 123(4), 354-373.
- Copeland, D. E., & Radvansky, G. A. (2001). Phonological similarity in working memory. *Memory & cognition*, 29(5), 774-776.
- Courage, M. L., & Cowan, N. (2009). *The development of memory in infancy and childhood* (2nd ed.). Hove: Psychology Press.
- Cowan, N. (1988). Evolving conceptions of memory storage, selective attention, and their mutual constraints within the human information-processing system. *Psychological-Bulletin*, 104(2), 163-191.
- Cowan, N. (1992). Verbal Memory Span and the Timing of Spoken Recall. *Journal of Memory and Language*, 31(5), 668-684.
- Cowan, N. (1999). The differential maturation of two processing speed rates related to digit span. *Journal of experimental child psychology*, 72(3), 193-209.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(1), 87-185.
- Cowan, N. (2005). On the capacity of attention: Its Estimation and its role in working memory and cognitive aptitudes. *Cognitive Psychology*, 51, 42-100.
- Cowan, N., & Alloway, T. P. (1997). The development of working memory. *The development of memory in childhood* (pp. 163-200).
- Cowan, N., Roudner, J. N., Blume, C. L., & Saults, J. S. (2012). Models of Verbal Working Memory Capacity: What Does It Take to Make Them Work? *Psychological review*, 119(3), 480-499.
- Craik, F. I. M., & Lockhart, R. S. (1972). Levels of Processing - Framework for Memory Research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 11(6), 671-684.
- Daneman, M., & Carpenter, P. A. (1980). How Children and Adults Detect Their Own Comprehension Errors. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 16(3), 150-150.

BIBLIOGRAPHIE

- Engle, R. W. (1994). Individual differences in memory and their implications for learning. In R. J. Sternberg (Ed.), *Encyclopedia of human intelligence*. Macmillan Publishing Co.
- Engle, R. W., Cantor, J., & Carullo, J. (1992). Individual differences in working memory and comprehension: A test of four hypotheses. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *18*(5), 972-992.
- Engle, R. W., Conway, A. R. A., Tuholski, S. W., & Shisler, R. J. (1995). A Resource Account of Inhibition. *Psychological Science*, *6*(2), 122-125.
- Engle, R. W., & Kane, M. J. (2004). Executive attention, working memory capacity, and a two-factor theory of cognitive control. *Psychology of Learning and Motivation: Advances in Research and Theory, Vol 44*, *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*(3), 309-331.
- Ericsson, K. A., & Kintsch, W. (1995). Long-Term Working-Memory. *Psychological review*, *102*(2), 211-245.
- Fallon, A. B., Groves, K., & Tehan, G. (1999). Phonological similarity and trace degradation in the serial recall task: When CAT helps RAT, but not MAN. *International Journal of Psychology*, *34*(5-6), 301-307.
- 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*(2), 283-&.
- Ford, S., & Silber, K. P. (1994). Working-Memory in Children - a Developmental-Approach to the Phonological Coding of Pictorial Material. *British Journal of Developmental Psychology*, *12*, 165-175.
- Fournet, N., Juphard, A., Monnier, C., & Roulin, J. L. (2003). Phonological similarity in free and serial recall: The effect of increasing retention intervals. *International Journal of Psychology*, *38*(6), 384-389.
- Friedman, N. P., & Miyake, A. (2004). The Relations Among Inhibition and Interference Control Functions: A Latent-Variable Analysis. *Journal of Experimental Psychology: General*, *133*(1), 101-135.
- Gaillard, V., Barrouillet, P., Jarrold, C., & Camos, V. (2011). Developmental differences in working memory: Where do they come from? *Journal of experimental child psychology*, *110*(3), 469-479.
- Gathercole, S. E. (1998). The development of memory. *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, *39*(1), 3-27.

BIBLIOGRAPHIE

- Gathercole, S. E., & Adams, A. M. (1993). Phonological Working-Memory in Very Young-Children. *Developmental Psychology, 29*(4), 770-778.
- Gathercole, S. E., & Adams, A. M. (1994). Children's phonological working memory: Contributions of long-term knowledge and rehearsal. *Journal of Memory and Language, 33*, 672-672.
- Gathercole, S. E., Adams, A. M., & Hitch, G. J. (1994). Do Young-Children Rehearse - an Individual-Differences Analysis. *Memory & cognition, 22*(2), 201-207.
- Gathercole, S. E., & Baddeley, A. D. (1989). Evaluation of the Role of Phonological Stm in the Development of Vocabulary in Children - a Longitudinal-Study. *Journal of Memory and Language, 28*(2), 200-213.
- Gathercole, S. E., Brown, L., & Pickering, S. J. (2003). Working memory assessments at school entry as longitudinal predictors of National Curriculum attainment levels. *Educational and Child Psychology, 20*(3), 109-122.
- Gavens, N., & Barrouillet, P. (2004). Delays of retention, processing efficiency, and attentional resources in working memory span development. *Journal of Memory and Language, 51*(4), 644-657.
- Gruber, O. (2001). Effects of domain-specific interference on brain activation associated with verbal working memory task performance. *Cerebral Cortex, 11*(11), 1047-1055.
- Gruber, O., & von Cramon, D. Y. (2001). Domain-specific distribution of working memory processes along human prefrontal and parietal cortices: a functional magnetic resonance imaging study. *Neuroscience Letters, 297*(1), 29-32.
- Gruber, O., & von Cramon, D. Y. (2003). The functional neuroanatomy of human working memory revisited - Evidence from 3-T fMRI studies using classical domain-specific interference tasks. *NeuroImage, 19*(3), 797-809.
- Gupta, P., Lipinski, J., & Aktunc, E. (2005). Reexamining the phonological similarity effect in immediate serial recall: The roles of type of similarity, category cuing, and item recall. *Memory & cognition, 33*(6), 1001-1016.
- Hall, J. W., Wilson, K. P., Humphreys, M. S., Tinzmann, M. B., & Bowyer, P. M. (1983). Phonemic-Similarity Effects in Good Vs Poor Readers. *Memory & cognition, 11*(5), 520-527.
- Halliday, M. S., Hitch, G. J., Lennon, B., & Pettipher, C. (1990). Verbal short-term memory in children: The role of the articulator loop. *European Journal of Cognitive Psychology, 2*(1), 23-38.

BIBLIOGRAPHIE

- Hasselhorn, M., & Grube, D. (2003). The phonological similarity effect on memory span in children: Does it depend on age, speech rate, and articulatory suppression? *International Journal of Behavioral Development*, 27(2), 145-152.
- Henry, L. A. (1991). 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.
- Henry, L. A., & Millar, S. (1991). Memory Span Increase with Age - a Test of 2 Hypotheses. *Journal of experimental child psychology*, 51(3), 459-484.
- Henry, L. A., Turner, J. E., Smith, P. T., & Leather, C. (2000). Modality effects and the development of the word length effect in children. *Memory*, 8(1), 1-17.
- Hitch, G. J., & Halliday, M. S. (1983). Working Memory in Children. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences*, 302(1110), 325-340.
- Hitch, G. J., Halliday, M. S., Dodd, A., & Littler, J. E. (1989). Development of Rehearsal in Short-Term-Memory - Differences between Pictorial and Spoken Stimuli. *British Journal of Developmental Psychology*, 7, 347-362.
- Hitch, G. J., Halliday, M. S., Schaafstal, A. M., & Heffernan, T. M. (1991). Speech, Inner Speech, and the Development of Short-Term-Memory - Effects of Picture-Labeling on Recall. *Journal of experimental child psychology*, 51(2), 220-234.
- Hudjetz, A., & Oberauer, K. (2007). The effects of processing time and processing rate on forgetting in working memory: Testing four models of the complex span paradigm. *Memory & cognition*, 35(7), 1675-1684.
- Hulme, C. (1984). Developmental Differences in the Effects of Acoustic Similarity on Memory Span. *Developmental Psychology*, 20(4), 650-652.
- Hulme, C., Maughan, S., & Brown, G. D. A. (1991). Memory for Familiar and Unfamiliar Words - Evidence for a Long-Term-Memory Contribution to Short-Term-Memory Span. *Journal of Memory and Language*, 30(6), 685-701.
- Hulme, C., Roodenrys, S., Schweickert, R., Brown, G. D. A., Martin, S., & Stuart, G. (1997). Word-frequency effects on short-term memory tasks: Evidence for a reintegration process in immediate serial recall. *Journal of Experimental Psychology-Learning Memory and Cognition*, 23(5), 1217-1232.
- Jalbert, A., Neath, I., Bireta, T. J., & Surprenant, A. M. (2011). When Does Length Cause the Word Length Effect? *Journal of Experimental Psychology-Learning Memory and Cognition*, 37(2), 338-353.

BIBLIOGRAPHIE

- Jalbert, A., Neath, I., & Surprenant, A. M. (2011). Does length or neighborhood size cause the word length effect? *Memory & cognition*, 39(7), 1198-1210.
- Jarrold, C., & Citroen, R. (2013). Reevaluating key evidence for the development of rehearsal: phonological similarity effects in children are subject to proportional scaling artifacts. *Developmental Psychology*, 49(5), 837-847.
- Jarrold, C., Hewes, A. K., & Baddeley, A. D. (2000). Do two separate speech measures constrain verbal short-term memory in children? *Journal of Experimental Psychology-Learning Memory and Cognition*, 26(6), 1626-1637.
- Jarrold, C., & Tam, H. (2011). Rehearsal and the development of working memory. *Cognitive development and working memory: A dialogue between neo-Piagetian theories and cognitive approaches*, 177-199.
- Jarrold, C., Tam, H., Baddeley, A. D., & Harvey, C. E. (2011). How Does Processing Affect Storage in Working Memory Tasks? Evidence for Both Domain-General and Domain-Specific Effects. *Journal of Experimental Psychology-Learning Memory and Cognition*, 37(3), 688-705.
- Johnson, M. K., Raye, C. L., Mitchell, K. J., Greene, E. J., Cunningham, W. A., & Sanislow, C. A. (2005). Using fMRI to investigate a component process of reflection: Prefrontal correlates of refreshing a just-activated representation. *Cognitive Affective & Behavioral Neuroscience*, 5(3), 339-361.
- Jolicoeur, P., & Dell'Acqua, R. (1998). The demonstration of short-term consolidation. *Cognitive Psychology*, 36(2), 138-202.
- Jones, D. M. (1993). Objects, streams and threads of auditory attention. In A. D. Baddeley & L. Weiskrantz (Eds.), *Attention: Selection, Awareness and Control* (pp. 87-104). Oxford, UK: Clarendon.
- Karbach, J., & Unger, K. (2014). Executive control training from middle childhood to adolescence. *Frontiers in Psychology*, 5, 390.
- Karbach, J., & Verhaeghen, P. (2014). Making Working Memory Work: A Meta-Analysis of Executive-Control and Working Memory Training in Older Adults. *Psychological Science*, 25(11), 2027-2037.
- Lampit, A., Hallock, H., & Valenzuela, M. (2014). Computerized Cognitive Training in Cognitively Healthy Older Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis of Effect Modifiers. *Plos Medicine*, 11(11).
- LaPointe, L. B., & Engle, R. W. (1990). Simple and Complex Word Spans as Measures of Working Memory Capacity. *Journal of Experimental Psychology-Learning Memory and Cognition*, 16(6), 1118-1133.

BIBLIOGRAPHIE

- Leather, C. V., & Henry, L. A. (1994). Working-Memory Span and Phonological Awareness Tasks as Predictors of Early Reading-Ability. *Journal of experimental child psychology, 58*(1), 88-111.
- Leclercq, A. L., & Majerus, S. (2010). Serial-Order Short-Term Memory Predicts Vocabulary Development: Evidence From a Longitudinal Study. *Developmental Psychology, 46*(2), 417-427.
- Lépine, R., Barrouillet, P., & Camos, V. (2005). What makes working memory spans so predictive of high-level cognition? *Psychonomic Bulletin & Review, 12*(1), 165-170.
- Lépine, R., Barrouillet, P., & Camos, V. (2005). What makes working memory spans so predictive of high-level cognition? *Psychonomic Bulletin & Review, 12*(1), 165-170.
- Lewandowsky, S., & Farrell, S. (2008). Phonological similarity in serial recall: Constraints on theories of memory. *Journal of Memory and Language, 58*(2), 429-448.
- Loaiza, V. M., & Camos, V. (in prep.). The nature of stored representations in working memory depends on the maintenance strategy and cognitive load.
- Loaiza, V. M., & McCabe, D. P. (2012). Temporal-contextual processing in working memory: Evidence from delayed cued recall and delayed free recall tests. *Memory & cognition, 40*(2), 191-203.
- Loaiza, V. M., & McCabe, D. P. (2013). The influence of aging on attentional refreshing and articulatory rehearsal during working memory on later episodic memory performance. *Aging Neuropsychology and Cognition, 20*(4), 471-493.
- Lobley, K. J., Baddeley, A. D., & Gathercole, S. E. (2005). Phonological similarity effects in verbal complex span. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section a-Human Experimental Psychology, 58*(8), 1462-1478.
- Luck, S. J., & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature, 390*(6657), 279-281.
- Macnamara, B. N., Moore, A. B., & Conway, A. R. A. (2011). Phonological similarity effects in simple and complex span tasks. *Memory & cognition, 39*(7), 1174-1186.
- Magimairaj, B. M., & Montgomery, J. W. (2012). Children's verbal working memory: Relative importance of storage, general processing speed, and domain-general controlled attention. *Acta psychologica, 140*(3), 196-207.
- Martin, R. C. (2005). Components of Short-Term Memory and Their Relation to Language Processing Evidence From Neuropsychology and Neuroimaging. *Current Directions in Psychological Science, 14*(4), 204-208.

BIBLIOGRAPHIE

- Masson, M. E. J. (2011). A tutorial on a practical Bayesian alternative to null-hypothesis significance testing. *Behavior Research Methods*, 43(3), 679-690. doi: Doi 10.3758/S13428-010-0049-5
- McCabe, D. P. (2008). The role of covert retrieval in working memory span tasks: Evidence from delayed recall tests. *Journal of Memory and Language*, 58(2), 480-494.
- McElree, B. (2001). Working memory and focal attention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 27(3), 817-835.
- Melby-Lervag, M., & Hulme, C. (2013). Is Working Memory Training Effective? A Meta-Analytic Review. *Developmental Psychology*, 49(2), 270-291.
- Miller, G. A. (1956). The Magical Number 7, Plus or Minus 2 - Some Limits on Our Capacity for Processing Information. *Psychological review*, 63(2), 81-97.
- Miller, G. A., Galanter, E., & Pribram, K. H. (1960). *Plans and the structure of behavior*. S.l.: Holt Rinehart & Winston.
- Mora, G. (2011). *Les mécanismes de maintien de l'information verbale en mémoire de travail*. (Thèse de doctorat), Dijon.
- Mora, G., & Camos, V. (2013). Two Systems of Maintenance in Verbal Working Memory: Evidence from the Word Length Effect. *Plos One*, 8(7).
- Mora, G., & Camos, V. (2015). Dissociating Rehearsal and Refreshing in the Maintenance of Verbal Information in 8-Year-Old Children. *Frontiers in Psychology*, 6.
- Murray, D. J. (1968). Articulation and Acoustic Confusability in Short-Term Memory. *Canadian Psychologist-Psychologie Canadienne*, 9(2), 286-&.
- Neath, I. (2000). Modeling the effects of irrelevant speech on memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 7(3), 403-423.
- New, B., Pallier, C., Ferrand, L., & Matos, R. (2001). A lexical database for contemporary french on internet: Lexique. *Annee Psychologique*, 101(3), 447-462.
- Newell, A., & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving*. Englewood Cliffs N.J.: Prentice-Hall.
- Oberauer, K. (2002). Access to information in working memory: Exploring the focus of attention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 28(3), 411-421.
- Oberauer, K., & Kliegl, R. (2006). A formal model of capacity limits in working memory. *Journal of Memory and Language*, 55(4), 601-626.

BIBLIOGRAPHIE

- Peereman, R., Lété, B., & Sprenger-Charolles, L. (2007). Manulex-infra: Distributional characteristics of grapheme-phoneme mappings, and infralexical and lexical units in child-directed written material. *Behavior Research Methods*, *39*(3), 579-589.
- Peterson, L. R., & Peterson, M. J. (1959). Short-Term Retention of Individual Verbal Items. *Journal of Experimental Psychology*, *58*(3), 193-198.
- Poirier, M., & Saint-Aubin, J. (2003). Word frequency effects in immediate serial recall: Item familiarity and item co-occurrence have the same effect. *Memory*, *13*(3-4), 325-332.
- Portrat, S., Barrouillet, P., & Camos, V. (2008). Time-Related Decay or Interference-Based Forgetting in Working Memory? *Journal of Experimental Psychology-Learning Memory and Cognition*, *34*(6), 1561-1564.
- Portrat, S., Camos, V., & Barrouillet, P. (2009). Working memory in children: A time-constrained functioning similar to adults. *Journal of experimental child psychology*, *102*(3), 368-374.
- Raye, C. L., Johnson, M. K., Mitchell, K. J., Reeder, J. A., & Greene, E. J. (2002). Neuroimaging a single thought: Dorsolateral PFC activity associated with refreshing just-activated information. *NeuroImage*, *15*(2), 447-453
- Redick, T. S., Broadway, J. M., Meier, M. E., Kuriakose, P. S., Unsworth, N., Kane, M. J., & Engle, R. W. (2012). Measuring Working Memory Capacity With Automated Complex Span Tasks. *European Journal of Psychological Assessment*, *28*(3), 164-171.
- Romani, C., McAlpine, S., Olson, A., Tsouknida, E., & Martin, R. (2005). Length, lexicality, and articulatory suppression in immediate recall: Evidence against the articulatory loop. *Journal of Memory and Language*, *52*(3), 398-415.
- Roodenrys, S., Hulme, C., Alban, J., Ellis, A. W., & Brown, G. D. (1994). Effects of word frequency and age of acquisition on short-term memory span. *Mem Cognit*, *22*(6), 695-701.
- Saint-Aubin, J., & LeBlanc, J. (2005). Word frequency effects in immediate serial recall of pure and mixed lists: tests of the associative link hypothesis. *Canadian Journal of Experimental Psychology-Revue Canadienne De Psychologie Experimentale*, *59*(4), 219-227.
- Saint-Aubin, J., & Poirier, M. (2005). Word frequency effects in immediate serial recall: item familiarity and item co-occurrence have the same effect. *Memory*, *13*(3-4), 325-332.
- Shallice, T., & Warrington, E. K. (1970). Independent functioning of verbal memory stores: a neuropsychological study. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *22*(2), 261-273.

BIBLIOGRAPHIE

- Snodgrass, J. G., & Vanderwart, M. (1980). Standardized Set of 260 Pictures - Norms for Name Agreement, Image Agreement, Familiarity, and Visual Complexity. *Journal of Experimental Psychology-Human Learning and Memory*, 6(2), 174-215.
- Sperling, G. (1960). The Information Available in Brief Visual Presentations. *Psychological Monographs*, 74(11), 1-29.
- Stevanovski, B., & Jolicoeur, P. (2007). Visual short-term memory: Central capacity limitations in short-term consolidation. *Visual Cognition*, 15(5), 532-563.
- Swanson, H. L., Jerman, O., & Zheng, X. H. (2008). Growth in working memory and mathematical problem solving in children at risk and not at risk for serious math difficulties. *Journal of Educational Psychology*, 100(2), 343-379.
- Tam, H., Jarrold, C., Baddeley, A. D., & Sabatos-DeVito, M. (2010). The development of memory maintenance: Children's use of phonological rehearsal and attentional refreshment in working memory tasks. *Journal of experimental child psychology*, 107(3), 306-324.
- Tehan, G., Hendry, L., & Kocinski, D. (2001). Word length and phonological similarity effects in simple, complex, and delayed serial recall tasks: Implications for working memory. *Memory*, 9(4-6), 333-348.
- Tehan, G., & Humphreys, M. S. (1995). Transient phonemic codes and immunity to proactive interference. *Memory & cognition*, 23(2), 181-191.
- Titz, C., & Karbach, J. (2014). Working memory and executive functions: effects of training on academic achievement. *Psychological Research*, 78(6), 852-868.
- Trapp, S., Mueller, K., Lepsien, J., Kramer, B., & Gruber, O. (2014). Different neural capacity limitations for articulatory and non-articulatory maintenance of verbal information. *Experimental Brain Research*, 232(2), 619-628.
- Trost, S., & Gruber, O. (2012). Evidence for a Double Dissociation of Articulatory Rehearsal and Non-Articulatory Maintenance of Phonological Information in Human Verbal Working Memory. *Neuropsychobiology*, 65(3), 133-140.
- Turner, M. L., & Engle, R. W. (1989). Is working memory capacity task dependent? *Journal of Memory and Language*, 28(2), 127-154.
- Vergauwe, E., Barrouillet, P., & Camos, V. (2010). Do mental processes share a domain-general resource? *Psychological Science*, 21(3), 384-390.
- Vergauwe, E., Camos, V., & Barrouillet, P. (2014). The Impact of Storage on Processing: How Is Information Maintained in Working Memory? *Journal of Experimental Psychology-Learning Memory and Cognition*, 40(4), 1072-1095.

Annex

Annex IV-1 : Lists of words used in the Experiment 5.

Group	Block	Sets								
		Rhyming			Phonologically similar			Phonologically dissimilar		
		word	phonetic	frequency	word	phonetic	frequency	word	phonetic	frequency
1	1	bac	bak	47.00	vis	vis	42.92	bête	bEt	47.70
		lac	lak		pipe	pip		basse	bas	
		pâques	pak		riche	RiS		chic	Sik	
	2	baisse	bEs	46.40	phare	faR	48.96	char	SaR	45.36
		caisse	kEs		cape	kap		belle	bEl	
		laisse	lEs		gaz	gaz		lis	lis	
		fer	fER		face	fas		sel	sEl	
		guerre	gER		lard	laR		bip	bip	
		serre	SER		vase	vaz		case	kaz	
3	dire	diR	47.77	peine	pEn	47.30	nappe	nap	47.94	
	rire	RiR		set	sEt		scène	sEn		
	tir	tiR		mèche	mES		type	tip		
	pile	piL		gel	ZEL		niche	niS		
	cil	sil		veine	vEn		bêche	bES		
	mille	miL		pêche	pES		tape	tap		
2	1	femme	fam	44.93	biche	biS	48.93	tasse	tas	48.89
		lame	lam		file	fiS		dette	dEt	
		rame	Ram		pic	pik		tic	tik	
	2	peine	pEn	49.80	lame	lam	51.86	pêche	pES	38.76
		scène	sEn		tasse	tas		pâques	pak	
		veine	vEn		bac	bak		riche	RiS	
		bip	bip		tic	tik		guerre	gER	
		pipe	pip		dire	diR		rame	Ram	
		type	tip		niche	niS		pic	pik	
3	cape	kap	46.70	bête	bEt	45.51	pile	piL	45.98	
	nappe	nap		serre	sER		face	fas		
	tape	tap		laisse	lEs		mèche	mES		
	belle	bEl		chic	Sik		vase	vaz		
	sel	sEl		rire	RiR		tir	tiR		
	gel	ZEL		mille	miL		baisse	bEs		
3	1	lis	lis	38.70	caisse	kEs	41.25	lac	lak	51.42
		vis	vis		bêche	bES		biche	biS	
		file	fiS		dette	dEt		set	sEt	
	2	phare	faR	50.99	basse	bas	47.17	fer	fER	46.66
		char	SaR		femme	fam		peine	pEn	
		lard	laR		case	kaz		dire	diR	
		pic	pik		bip	bip		lard	laR	
		chic	Sik		pile	piL		rire	RiR	
		tic	tik		tir	tiR		serre	sER	
3	bête	bEt	49.06	pâques	pak	47.47	cape	kap	48.64	
	set	sEt		char	SaR		caisse	kEs		
	dette	dEt		nappe	nap		bac	bak		
	bêche	bES		sel	sEl		mille	miL		
	mèche	mES		baisse	bEs		phare	faR		
	pêche	pES		guerre	gER		veine	vEn		
3	gaz	gaz	49.06	cil	sil	47.47	vis	vis	48.64	
	vase	vaz		lis	lis		femme	fam		
	case	kaz		type	tip		gel	ZEL		
	basse	bas		fer	fER		file	fiS		
	tasse	tas		scène	sEn		pipe	pip		
	face	fas		belle	bEl		laisse	lEs		
3	biche	biS	49.06	rame	Ram	47.47	lame	lam	48.64	
	niche	niS		lac	lak		lame	lam		
	riche	RiS		tape	tap		lame	lam		

Frequency per block corresponds to the mean frequency of words within a group of two lists according to *Lexique 3* database. In red, the example of the word « rire » which is present one time in each set and also one time in each group. Different background colors correspond to different central phoneme and each shade of gray corresponds to one group.