

Optimisation et rééducation de la mémoire de travail : une synthèse critique

S. MAJERUS

Professeur, Maître de recherche F.R.S.-FNRS, Unité de recherche en psychologie et neurosciences cognitives PsyNCog, Université de Liège, boulevard du Rectorat, B33, 4000 Liège, Belgique. Email : smajerus@ulg.ac.be

RÉSUMÉ : Optimisation et rééducation de la mémoire de travail : une synthèse critique

La mémoire à court terme (MCT)¹ et la mémoire de travail (MT) sont des fonctions cognitives centrales déterminant les capacités d'apprentissage et de raisonnement chez l'enfant. Des troubles de la MCT/MT sont observés dans de nombreux troubles développementaux et neurodéveloppementaux. Dans ce contexte, un nombre croissant d'études s'est intéressé à l'optimisation des capacités de la MCT/MT. Une évaluation critique de ces études démontre une efficacité relativement limitée des études utilisant des batteries de stimulation de la MCT/MT informatisées et générales ne tenant pas compte de la complexité et de l'hétérogénéité des troubles de la MCT/MT. Des approches théoriquement motivées et individualisées semblent plus prometteuses mais elles sont basées en grande partie sur des études de cas, et leur robustesse ainsi que leur applicabilité sur des populations d'enfants diverses doit encore être démontrée. Des recherches multicentriques et à long terme seront nécessaires pour déterminer les paramètres optimaux d'une approche rééducative de la MCT/MT chez l'enfant.

Mots clés : *Mémoire court terme – Mémoire de travail – Rééducation – Stimulation.*

SUMMARY: *Optimisation and rehabilitation of the working memory: a critical review*

Short-term memory (STM) and working memory (WM) are critical determinants of reasoning and learning abilities in children. STM/WM deficits are observed in many developmental and neurodevelopmental disorders. An increasing number of studies has targeted the enhancement of STM/WM abilities. A critical analysis of published studies on STM/WM training reveals a limited efficiency of studies using general computerized STM/WM training strategies which do not take into account the heterogeneity of STM/WM deficits. Theoretically motivated and individualized STM/WM rehabilitation studies show promising results but they are essentially based on case studies, and their robustness and applicability on various children populations still needs to be demonstrated. Multicentric and long-term study protocols are necessary in order to determine the optimal parameters of STM/WM training/rehabilitation strategies in children.

Key words: *Short-term memory – Working memory – Rehabilitation – Training.*

RESUMEN: *Optimización y reeducación de la memoria de trabajo: síntesis crítica*

La memoria a corto plazo (MCP) y la memoria de trabajo (MT) son funciones cognitivas centrales que determinan las capacidades de aprendizaje y de razonamiento en el niño. En muchos trastornos de desarrollo y neurodesarrollo se observan trastornos de la MCP/MT. En este contexto, un número creciente de estudios se centran en la optimización de las capacidades de la MCP/MT. Una evaluación crítica de estos trabajos demuestra la eficacia relativamente limitada de los estudios que emplean baterías de estimulación de la MCP/MT informatizadas y generales que no tienen en cuenta la complejidad y la heterogeneidad de los trastornos de la MCP/MT. Los enfoques teóricamente motivados e individualizados parecen más prometedores pero, en gran medida, se basan en estudios de casos y su solidez y aplicabilidad debe demostrarse en poblaciones infantiles. Es necesario realizar ensayos multicéntricos y a largo plazo para determinar los parámetros óptimos para la reeducación de la MCP/MT en el niño.

Palabras clave: *Memoria a corto plazo – memoria de trabajo – Reeducación – Estimulación.*

¹ Nous considérons ici que le terme MCT se rapporte à la situation du stockage temporaire d'informations, alors que le terme de MT se rapporte à la situation où l'information stockée est également transformée, manipulée ou interprétée. Le concept de MT inclut donc celui de MCT.

INTRODUCTION

Les déficits de la mémoire à court terme/mémoire de travail (MCT/MT) constituent une source de handicap scolaire et social méconnue. Les capacités réduites à maintenir temporairement des informations vont rendre difficile et ralentir toute une série d'activités de la vie quotidienne requérant le maintien *online* et conscient d'informations : l'encodage et le suivi de consignes, le calcul mental, la résolution de problèmes, la répétition de mots non-familiers, la prise de notes... En d'autres termes, toute situation nécessitant l'intégration d'informations présentées de façon simultanée et rapide ainsi que leur maintien et leur traitement risque de devenir problématique. Ces difficultés vont limiter les capacités d'apprentissage de l'enfant (Gathercole & Alloway, 2006).

De nombreuses études ont été réalisées au cours de ces 10 dernières années afin de remédier aux difficultés de la MCT/MT, le plus souvent chez l'enfant et l'adulte typique, ne présentant pas de déficits majeurs de la MCT/MT. Un certain nombre de logiciels d'entraînement commerciaux de la MCT/MT ont été proposés, accessibles aux non-spécialistes de la rééducation (parents, enseignants...). Ces logiciels permettent de stimuler la MCT/MT de façon globale et multimodale, sans analyse approfondie préalable de la nature des déficits de la MCT/MT présentés par l'enfant (ou l'adulte). Comme nous allons le voir, les études ayant évalué l'efficacité de ce type de rééducation sont actuellement peu concluantes. Une autre approche, davantage informée par les modèles théoriques récents de la MCT/MT, tient compte de la nature des déficits présentés par l'enfant, et propose une rééducation de la MCT/MT taillée sur mesure. Plusieurs études, chez l'enfant et chez l'adulte, semblent montrer que cette approche plus directe et ciblée peut, dans certains cas, diminuer les déficits de la MCT/MT de façon importante, voire normaliser les performances dans les tâches de MCT/MT. Le désavantage de cette approche est qu'elle repose à l'heure actuelle essentiellement sur des études de cas et, comme nous allons le voir, les données en faveur de l'efficacité de ce type de rééducation doivent être considérées, au mieux, comme préliminaires et provisoires.

Afin de comprendre les avantages et inconvénients des différentes approches de la rééducation de la MCT/MT, nous effectuerons d'abord un bref survol des évolutions théoriques de la MCT/MT. Depuis la proposition il y a 40 ans du modèle modulaire de la MCT/MT (Baddeley & Hitch, 1974), les cadres théoriques de la MCT/MT ont en effet changé de manière importante. Le modèle modulaire original de Baddeley et Hitch distingue des sous-systèmes spécialisés en fonction de la nature des informations à mémoriser, avec la boucle phonologique pour le stockage à court terme des informations verbales et le calepin visuo-spatial pour le stockage à court terme des informations visuo-spatiales, ainsi qu'un système de supervision attentionnelle coordonnant les informations stockées dans ces sous-systèmes. Les conceptions théoriques actuelles ont apporté des précisions importantes à cette architecture de

la MCT/MT, tout en remettant parfois en cause certains postulats de base du modèle modulaire initial (voir Majerus, 2013, pour une synthèse récente).

Une des évolutions les plus importantes a été la mise en évidence de l'importance de l'accès aux représentations en mémoire à long terme (MLT) lors de tâches de MCT/MT. De nombreux travaux ont montré que le succès de rappel dans les tâches de MCT dépend en grande partie de l'accès aux connaissances en MLT : alors que l'empan de mot pour des listes de mots familiers peut monter jusqu'à 5-6 mots, il dépasse rarement les 2 mots quand il s'agit de rappeler des listes de mots peu familiers tels que *sourtib*, *vrépyme*... (Hulme, Maughan & Brown, 1991 ; Majerus & van der Linden, 2003). Ainsi, la première étape en MCT est l'activation des représentations phonologiques, sémantiques et syntaxiques en MLT, et plus ces représentations sont activées facilement et rapidement, meilleur sera le maintien à court terme de ces informations. Des mécanismes similaires ont également été récemment mis en évidence pour le stockage d'informations en MCT visuo-spatiale (Kaiser, Stein & Peelen, 2015).

Un autre aspect important est la capacité non seulement à retenir l'identité des informations (information « item »), mais également leur ordre d'apparition (information « ordre sériel »). Beaucoup de modèles théoriques de la MCT opèrent actuellement une distinction entre processus « item » censés dépendre de l'accès aux représentations correspondantes en MLT (Baddeley, Gathercole & Papagno, 1998 ; Burgess & Hitch, 2006 ; Martin & Saffran, 1992) et processus sériels censés dépendre de mécanismes d'ordination spécifiques de nature spatiale, temporelle, numérique ou énergétique (Botvinick & Watanabe, 2007 ; Burgess & Hitch, 2006 ; Page & Norris, 1998 ; Van Dijk, Abrahamse, Majerus & Fias, 2013).

Une autre évolution théorique majeure concerne la reconnaissance de plus en plus importante de l'influence des capacités attentionnelles sur les performances en MCT/MT. Baddeley et Hitch (1974), via la composante de l'administrateur central, reconnaissent l'intervention de ressources attentionnelles dans les situations où les capacités de stockage de base sont dépassées. Les modèles théoriques actuels donnent un rôle encore plus important aux capacités attentionnelles, en considérant qu'elles définissent directement les capacités de stockage, toute tâche de MCT étant avant tout une tâche nécessitant une focalisation de l'attention sur des stimuli-cibles (Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004 ; Cowan, 1995). Même si la nature de ces capacités attentionnelles reste encore à être définie de façon précise, ces capacités sont souvent mises en lien avec des processus attentionnels permettant de focaliser l'attention, de façon contrôlée ou non-stratégique, sur les informations à mémoriser (attention sélective). Finalement, le processus plus général de la récapitulation articulatoire subvocale est un mécanisme puissant qui permet d'augmenter les capacités de mémorisation verbale à court terme en rafraîchissant et en réactivant les informations temporairement stockées via leur répétition subvocale. Ce mécanisme, fondamental

dans le modèle modulaire initial de la mémoire de travail de Baddeley et Hitch, reste un mécanisme incontournable pour la rééducation/l'optimisation de la MCT. Un mécanisme similaire a également été proposé pour le rafraîchissement non-verbal des informations en MCT : selon Camos et Barrouillet (2014), le redéploiement répété du focus attentionnel sur les informations à maintenir en MCT permet de réactiver ou stabiliser ces informations, les protégeant ainsi d'un effacement temporel progressif.

RÉÉDUCATION/OPTIMISATION DE LA MCT/MT VIA DES PROGRAMMES D'ENTRAÎNEMENTS GÉNÉRAUX

Comme indiqué plus haut, ces dernières années ont été caractérisées par l'apparition d'un nombre croissant d'études utilisant des batteries informatisées générales censées améliorer les capacités de la MCT/MT chez des enfants ou des adultes, présentant des déficits avérés de la MCT/MT ou non. Ces batteries consistent à présenter au sujet des tâches de MCT et de MT diverses, à la fois dans les modalités auditives et verbales. Un avantage de ces batteries est qu'elles sont informatisées, et donc standardisées, et elles s'adaptent automatiquement au niveau de difficulté du sujet. Les batteries les plus couramment utilisées sont *Cogmed* (Klingberg *et al.*, 2005) ou, plus spécifiquement pour les enfants, *Jungle Memory* (Alloway, Bibile & Lau, 2013). Ces batteries permettent au sujet de s'entraîner à diverses tâches de MCT/MT. Le postulat sous-jacent est que via l'entraînement à des tâches de MCT/MT, les capacités intrinsèques de la MCT/MT augmentent, ou les sujets apprennent à utiliser leurs capacités de manière plus efficace grâce à un recours plus efficace à diverses stratégies (récapitulation, regroupement de l'information - *chunking*). Les études réalisées dans ce domaine auprès d'enfants et d'adultes typiques montrent que ce type d'entraînement peut effectivement avoir des effets positifs sur les performances aux tâches de MCT/MT (Gibson *et al.*, 2012, 2013 ; Jolles, Grol, Van Buchem, Rombouts & Crone, 2010 ; Olesen, Westerberg & Klingberg, 2004 ; voir Rabi-pour & Raz, 2012, pour une revue critique récente). Ces effets sont cependant souvent limités aux tâches entraînées avec relativement peu de transfert sur des tâches non-entraînées telles que des tâches de raisonnement verbal ou non-verbal ou d'autres tâches de MCT/MT (von Bastian & Oberauer, 2013). Un problème récurrent dans ces études est que les processus entraînés sont peu ou pas contrôlés, ce qui est à attribuer à un manque de cadrage théorique des batteries d'entraînement et des études qui les utilisent.

Ce type de conclusions est également valable en ce qui concerne l'utilisation de ce genre de batteries pour la rééducation de déficits de la MCT/MT auprès d'enfants présentant des troubles neurodéveloppementaux, tels que des troubles des apprentissages, des troubles du développement du langage oral (dysphasie), des troubles déficitaires de l'attention ou des troubles de la MCT/MT plus isolés (Alloway *et al.*, 2013 ; Chacko *et al.*, 2013 ; Dunning, Holmes & Gathercole, 2013 ; Gray *et al.*, 2012 ; Holmes,

Gathercole & Dunning, 2009 ; Holmes *et al.*, 2010 ; Klingberg, Forssberg & Westerberg, 2002 ; Klingberg *et al.*, 2005 ; Rapport, Orban, Kofler & Friedman, 2013).

D'un côté, ces études semblent montrer que des populations d'enfants bénéficient davantage de ce type d'entraînement que ce qui est observé auprès des sujets adultes sains, et ceci particulièrement pour les enfants les plus jeunes (Melby-Lervag & Hulme, 2013 ; Wass, Scerif & Johnson, 2012 ; voir cependant Peijnenborgh, Hurks, Aldenkamp, Vles & Hendriksen, 2015, pour des résultats opposés). Ceci suggère l'existence d'une plus grande plasticité cérébrale chez les sujets jeunes (Van Bastian & Oberauer, 2013). Les effets de ces rééducations se marquent en général sur des tâches de MCT/MT non-entraînées, ce qui peut être considéré comme un effet de transfert, et ceci particulièrement pour les tâches de MCT/MT visuo-spatiales.

En même temps, ces effets restent souvent limités à quelques tâches de MCT/MT, ou à une utilisation plus efficace de stratégies, sans réellement augmenter les capacités de la MCT/MT en tant que telle. Dans une étude récente, Holmes *et al.* (2015) ont tenté d'améliorer les capacités de MCT et de MT auprès d'enfants âgés de 8 à 11 ans présentant un faible niveau de développement langagier (dysphasie de l'enfant) associé à des troubles de la MCT verbale, ainsi qu'auprès d'enfants contrôles appariés en terme d'intelligence non-verbale. En utilisant la batterie d'entraînement *Cogmed*, un effet d'entraînement à travers les deux groupes était observé pour les aspects de la MCT visuo-spatiale, probablement en lien avec la prédominance d'exercices d'entraînement visuo-spatiaux dans la batterie *Cogmed*. Des améliorations étaient également observées pour les mesures de QI verbal et non-verbal. Pour les tâches de MCT verbale, les effets n'étaient pas robustes d'un point de vue statistique. Il faut cependant observer que les enfants présentant les capacités langagières les plus faibles bénéficiaient le plus de l'entraînement en termes de performances aux tâches de MCT verbale. Comme la plupart des études, un problème de ce type d'études est qu'elles ne permettent pas de distinguer les effets test-retest des effets de la rééducation, étant donné l'absence d'un groupe contrôle à qui on aurait administré les mêmes tests de MCT/MT à deux reprises sans qu'il aurait bénéficié d'un entraînement avec *Cogmed*. De même, la spécificité de l'effet de l'entraînement par *Cogmed* ne peut pas être évaluée dans ces études. Les effets de ces rééducations semblent également se marquer davantage par l'apprentissage implicite ou explicite de stratégies applicables à certaines tâches de MCT/MT, plutôt que par une augmentation des capacités de la MCT/MT. Swanson, Kehler et Jerman (2010) ont examiné les relations entre la connaissance de stratégies utiles pour les tâches de MCT/MT (récapitulation subvocale, regroupement - *chunking*, association, élaboration) et les performances dans des tâches de MCT/MT, et ceci auprès d'enfants présentant des troubles de lecture et des enfants contrôles (âge 10-11 ans). Ils ont observé que l'utilisation de stratégies améliorerait les performances dans les deux groupes, et qu'un entraînement à l'utilisation de stratégies accentuait encore cette amélioration. En même temps, la différence entre les

deux groupes en termes de performances de MCT/MT ne diminuait pas après l'entraînement, suggérant que l'entraînement n'avait pas amélioré les capacités de MCT/MT en tant que telles.

Finalement, très peu d'études ont évalué l'impact à moyen terme et le transfert sur des mesures fonctionnelles plus générales telles que la réussite scolaire ou le comportement en classe. Une étude récente a abordé cette question en étudiant les effets d'un entraînement par la batterie *Cogmed* et ceux d'un entraînement contrôle actif sur les performances à des tâches de MCT/MT, mais également sur des mesures comportementales et académiques chez des enfants présentant des troubles déficitaires de l'attention (van der Donk, Hiemstra-Beernink, Tjeenk-Kalff, van der Leij & Lindauer, 2015). Les enfants ont été évalués à la fin de l'entraînement, et 6 mois plus tard. Les auteurs ont observé un effet du temps sur les mesures de MCT/MT et les mesures comportementales, et ceci tout de suite après le traitement et 6 mois plus tard, mais ces effets étaient comparables pour les deux entraînements, l'entraînement *Cogmed* ne donnant un résultat supérieur que pour deux mesures de MCT (empans verbal et visuo-spatial). Ce dernier résultat doit cependant être relativisé, étant donné que l'entraînement contrôle actif comportait également des tâches d'entraînement de la MCT/MT en association avec une approche psychoéducative sur les troubles de la MT, de l'attention et des fonctions exécutives. La présence d'un troisième groupe contrôle ne recevant aucun entraînement actif ou un entraînement moins spécifique aurait été utile ici pour évaluer les effets de l'entraînement par *Cogmed* de façon plus directe. Le résultat le plus important était cependant l'absence totale d'un effet de l'entraînement sur les performances académiques, et ceci à court et à moyen terme. Ces résultats sont en contraste avec une méta-analyse récente ayant évalué l'impact d'un entraînement de la MCT/MT auprès d'enfants présentant des troubles des apprentissages, cette étude mettant en évidence des effets à court et à long terme (8 mois) à la fois pour des tâches de MCT verbale et visuo-spatiale et pour les performances de lecture (Peijnenborgh *et al.*, 2015). Ces résultats sont cependant de nouveau observés en prenant comme référence un groupe d'enfants ne recevant aucun entraînement contrôle. Finalement, Passolunghi et Costa (2016) ont observé qu'un entraînement de la MT améliorerait à la fois les performances à des tâches de MCT/MT et de traitement numérique chez des enfants de 5 ans, en comparaison à un groupe contrôle entraîné sur des tâches numériques.

En conclusion, le bilan des études utilisant des batteries générales d'entraînement de la MCT/MT pour améliorer les capacités de la MCT/MT chez l'enfant est très mitigé. Si ces études d'entraînement montrent en général une amélioration des performances à des tâches de MCT/MT entraînées et non-entraînées, surtout dans le domaine visuo-spatial, les effets plus généraux de ces entraînements, en termes de performances académiques, sont beaucoup moins clairs. Ce qui semble par contre davantage établi, c'est que ce type d'entraînement favorise d'abord l'apprentissage et l'utilisation plus efficace de stratégies

qui peuvent améliorer les performances dans certaines tâches de MCT/MT, mais sans pour autant réellement augmenter les capacités de la MCT/MT.

RÉÉDUCATION/OPTIMISATION DE LA MCT/MT VIA DES PROGRAMMES D'ENTRAÎNEMENT SPÉCIFIQUES

Un problème principal sous-jacent aux études passées en revue dans la section précédente est qu'elles considèrent que la MCT/MT dépend d'une capacité abstraite et générale, et qui peut être entraînée via la réalisation répétée de diverses tâches de MCT/MT. Cette approche a-théorique ne tient pas compte des évolutions récentes au niveau de notre compréhension des mécanismes sous-tendant la MCT/MT, et de la possibilité que ces mécanismes soient altérés de façon sélective. Dans ce contexte, une rééducation plus ciblée visant spécifiquement la composante déficitaire pourrait s'avérer plus efficace que l'administration d'une batterie générale visant tous les mécanismes en même temps. Au vu des conceptions théoriques récentes de la MCT brièvement présentées au début de cet article, nous pouvons considérer que la MCT/MT résulte de l'interaction d'au moins trois composantes : les connaissances en MLT, les capacités attentionnelles et le traitement de l'ordre sériel. Ainsi, un déficit de la MCT/MT peut apparaître pour au moins trois raisons différentes : des difficultés à activer et à maintenir l'identité des informations à mémoriser, des difficultés à encoder et maintenir les aspects sériels, et des difficultés de contrôle attentionnel (Majerus, Attout, Georger & van der Kaa, 2015).

Pour le reste de cet article, nous allons nous concentrer sur les stratégies de rééducation ciblant plus directement le premier cas de figure. Nous allons également présenter de façon conjointe les études réalisées auprès de sujet adultes et d'enfants, étant donné la littérature peu abondante concernant cette approche rééducative. Nos connaissances concernant les mécanismes permettant l'encodage de l'ordre sériel sont encore trop préliminaires pour pouvoir présenter des stratégies de rééducation valides au niveau théorique et validées au niveau empirique. Pour la rééducation des aspects attentionnels, qui ne sont pas spécifiques à la MCT/MT, le lecteur intéressé pourra consulter les synthèses de littérature de Rapport *et al.* (2013) ainsi que de Cortese *et al.* (2015), et une étude préliminaire sur la rééducation des troubles attentionnels auprès d'enfants ayant souffert d'un traumatisme crânien (Catroppa *et al.*, 2015).

Un des premiers aspects à considérer pour un enfant présentant un déficit de la MCT est l'intégrité des représentations en MLT. L'impact d'un déficit à ce niveau sur les performances en MCT verbale a été particulièrement bien montré via l'étude de patients présentant une perte de représentations lexico-sémantiques dans le contexte d'une aphasie acquise. Ces patients présentent une chute importante des performances en MCT quand ils doivent rappeler des listes de mots pour lesquels ils ont perdu les représentations lexico-sémantiques sous-jacentes (Patterson, Graham & Hodges, 1994). De la même façon, des

difficultés au niveau du traitement des aspects perceptifs et phonologiques vont perturber l'encodage des informations en MCT verbale (Martinez Perez, Majerus & Poncelet, 2013). Cet aspect est particulièrement important car la plupart des patients présentant un déficit de la MCT verbale le font dans le cadre de difficultés langagières, récentes ou anciennes, le déficit de la MCT verbale étant souvent un déficit résiduel associé aux difficultés langagières (voir Majerus, van der Linden, Poncelet & Metz-Lutz, 2004, pour un exemple dans le domaine de l'aphasie acquise chez l'enfant, et Martinez Perez *et al.*, 2013, pour un exemple dans le domaine de la dyslexie). Ainsi, pour chaque patient présentant un déficit de la MCT verbale ou visuo-spatiale, l'intégrité des connaissances sous-jacentes à chaque modalité d'informations doit être vérifiée. Si des problèmes sont observés à ce niveau, une rééducation des représentations langagières ou visuo-spatiales devrait être mise en place ou poursuivie si la rééducation est déjà en place. Ainsi, dans l'aphasie épileptique chez l'enfant, la récupération des fonctions langagières lexicales et phonologiques va de pair avec une augmentation des capacités de la MCT verbale (Majerus *et al.*, 2004).

Auprès de nombreux patients, l'examen de l'intégrité des connaissances en MLT ne va plus mettre en évidence des difficultés particulières, mais ces patients présentent un déficit de la MCT verbale qui paraît davantage isolé. La première stratégie qui s'impose ici est celle visant un rétablissement de la durée de maintien des activations à court terme : l'hypothèse sous-jacente est que le déficit de la MCT est causé par un effacement trop rapide des activations correspondantes en MLT (Martin & Saffran, 1992). À partir de cette hypothèse théorique, plusieurs auteurs ont élaboré des stratégies de rééducation ciblant cet effacement trop rapide des activations initiales des représentations langagières. Ces stratégies ont été utilisées avec succès dans plusieurs études. Ainsi, Majerus, van der Kaa, Renard, van der Linden et Poncelet (2005) ont décrit le cas d'une patiente présentant une MCT verbale déficitaire à la fois pour le maintien de mots et de non-mots alors que ses performances langagières en dénomination et en compréhension s'étaient normalisées - cette patiente présentait au départ, comme beaucoup de patients avec déficit de la MCT verbale, un syndrome aphasiologique. Une rééducation a été mise en place consistant à répéter sans délai des paires de non-mots avec feedback correctif (voir Majerus, 2016, pour une description détaillée). Cet entraînement se faisait à raison de 2 séances d'une demi-heure par journée, sur une période de 16 mois. À la fin de la rééducation, les performances de la patiente s'étaient normalisées au niveau de plusieurs mesures de la MCT verbale (empan de chiffres, empan de non-mots) et d'une tâche de jugement de rimes alors que ce type de tâches n'avait pas été entraîné. La patiente rapportait également des améliorations dans la vie quotidienne, avec moins de difficultés à suivre les conversations, à prendre des notes au téléphone. Cette évolution positive ne pouvait être attribuée à une récupération spontanée dans la mesure où le déficit de MCT verbale était stabilisé : les empan étaient restés déficitaires et stables sur une période de 3 ans précédant la mise en place de la rééducation de la MCT verbale, alors

que durant cette période de 3 ans une revalidation logopédique des symptômes langagiers avait été effectuée. Des approches similaires ont été adoptées par Francis, Clark et Humphreys (2003), Koenig-Bruhin et Studer-Eichenberger (2007) et Kalinyak-Fliszar, Kohen et Martin (2011). Ces trois études étaient des études de cas unique, et comme l'étude de Majerus *et al.* (2005), consistaient à faire répéter aux patients de l'information verbale (mots, phrases ou non-mots). Pour les trois patients, une augmentation des performances dans des tâches de MCT non-entraînées était observée, même si de façon très limitée dans les études de Koenig-Bruhin et Studer-Eichenberger (2007) et de Kalinyak *et al.* (2011). Une autre étude a permis de démontrer la spécificité des effets de ce type de rééducation en montrant qu'un patient présentant un déficit de maintien des informations phonologiques bénéficie d'une rééducation visant la rétention des informations phonologiques (via la répétition de listes de non-mots) mais ne bénéficie pas d'une rééducation visant la rétention d'informations lexico-sémantiques (via l'activation sémantique et la répétition de listes de mots) ; la situation inverse était observée pour un patient présentant un déficit de maintien de l'information lexico-sémantique (Harris, Olson & Humphries, 2014). Ces résultats démontrent de nouveau l'importance de viser de façon précise la composante responsable du déficit de la MCT, afin de mettre en place une stratégie de rééducation la plus adaptée et la plus efficace possible.

Finalement, d'autres travaux de rééducation se sont inspirés du cadre théorique initial de la mémoire de travail de Baddeley, Vallat *et al.* (2005) et ont développé une batterie consistant en l'administration de plus de 8 tâches d'entraînement impliquant toutes le maintien et la manipulation d'informations, soit verbales, soit visuo-spatiales, et ciblant la boucle phonologique (MCT verbale), la calepin visuo-spatial (MCT visuo-spatiale) ou l'administrateur central (MT) (Vallat *et al.*, 2005 ; Vallat-Azouvi, Pradat-Diehl & Azouvi, 2009). L'administration de cette batterie à un patient aphasique et deux patients traumatisés crâniens a montré une amélioration des performances, et ceci à la fois pour des tâches de MCT (empan direct) et de MT (empan à l'envers) entraînées et non-entraînées. L'avantage de ce type d'approche est qu'il cible plusieurs composantes de la MCT/MT en même temps, et est particulièrement indiqué quand plusieurs composantes sont atteintes, ce qui était le cas chez les trois patients.

Une autre stratégie à envisager est le contournement des déficits en MCT dans une modalité par une utilisation accrue des capacités de MCT dans une autre modalité qui elle est préservée. L'hypothèse générale est que le patient utilise les capacités préservées de stockage de la modalité préservée, pour recoder rapidement vers la modalité préservée les informations qui sont difficilement maintenues dans la modalité altérée. Cette technique a été mise en place par Closset et Majerus (2007) auprès d'un enfant de 10 ans présentant des déficits de la MCT auditivo-verbale importants. L'enfant était invitée à former rapidement des images visuelles mentales pour chaque mot entendu, et à maintenir les mots via leur image visuelle mentale. En

utilisant cette stratégie, la patiente atteignait des empan auditivo-verbaux de 6 mots, alors que sans cette stratégie, ses empan étaient limités à 2-3 mots. Et, comme attendu, le bénéfice de cette stratégie était limité aux informations concrètes, qui pouvaient être facilement recodées en images mentales ; les empan de non-mots restaient déficitaires. Cette constellation de résultats démontre la spécificité de ce type de rééducation de la MCT par contournement de la modalité déficitaire.

Finalement, une augmentation des capacités de la MCT peut être tentée en optimisant l'utilisation de stratégies générales telles que la récapitulation articulatoire subvocale. Comme nous l'avons vu, l'optimisation de ces stratégies semble notamment sous-tendre les quelques bénéfices observés dans les études d'entraînement de la MCT/MT par batteries d'entraînement informatisées et générales. La récapitulation articulatoire subvocale permet de réactiver et de rafraîchir les informations à mémoriser, et les protège ainsi de leur effacement en MCT. Ainsi, lors d'une rééducation de la MCT verbale, l'utilisation optimale de la récapitulation articulatoire peut être envisagée, en expliquant au patient l'existence de cette stratégie et en l'invitant à l'utiliser cette stratégie, en récapitulant d'abord à voix haute, et ensuite de façon silencieuse. Ce type de technique a été utilisé dans plusieurs études, montrant une augmentation de l'empan en MCT verbale, même si les gains restent généralement limités (une à deux unités maximum) (Closset & Majerus, 2007 ; Swanson, Kehler & Jerman, 2010). Cette stratégie peut être particulièrement utile auprès d'enfants qui présentent une réduction de la MCT et qui n'utilisent pas (encore) le processus de récapitulation articulatoire de façon systématique, celui-ci ne se mettant en place de façon fonctionnelle que vers l'âge de 7 ans (Gathercole, Adams & Hitch, 1994).

CONCLUSIONS

L'objectif de cette synthèse de littérature était d'évaluer la pertinence et la validité des stratégies de stimulation et de rééducation de la MCT/MT actuellement disponibles. Le bilan est, à l'heure actuelle, plutôt décevant. Des outils de stimulation informatisés de la MCT/MT ont été développés, mais ces outils ne tiennent en général pas compte de la complexité et de la diversité des déficits caractérisant les troubles de la MCT/MT. Ainsi, leur efficacité est toute relative : alors qu'elles conduisent en général à une augmentation (modeste) des performances à diverses tâches de MCT/MT, et ceci à la fois chez le sujet typique et le sujet présentant des déficits de la MCT/MT, ces batteries semblent surtout optimiser l'utilisation de stratégies spécifiques aux tâches, sans pour autant augmenter de façon significative les capacités de la MCT/MT en tant que telles. D'autres outils visent plus directement la rééducation de composantes spécifiques de la MCT/MT auprès de sujets présentant des déficits de la MCT/MT avérés, après une évaluation précise de la nature de ces déficits et à la lumière d'architectures théoriques récentes de la MCT/MT. Ces études, utilisant des stratégies de restauration ou de contournement des processus déficitaires, semblent

montrer que des approches rééducatives de la MCT/MT ciblant directement les processus déficitaires pourraient s'avérer plutôt efficaces, entraînant dans certains cas une normalisation des performances aux tâches de MCT/MT ainsi que des répercussions positives sur le fonctionnement scolaire et social. En même temps, ces études doivent être considérées comme des études de faisabilité, car elles sont actuellement basées sur un nombre de patients très limité ; il s'agit en effet essentiellement d'études de cas concernant majoritairement des patients cérébrolésés adultes. Ainsi, nous ne savons pas dans quelle mesure les résultats encourageants constatés dans ces études peuvent être généralisés à des populations d'enfants, et quels sont les paramètres optimaux en termes de durée et de fréquence de ces rééducations. Des études à plus large échelle, et surtout chez l'enfant présentant des troubles de la MCT/MT isolés ou en association avec d'autres troubles développementaux et neurodéveloppementaux, sont indispensables. Ces études devront impliquer des collaborations entre plusieurs équipes de recherche et pays, afin de pouvoir atteindre des groupes de patients de taille suffisante.

RÉFÉRENCES

- ALLOWAY, T., BIBILE, V. & LAU, G. (2013). Computerized working memory training: Can it lead to gains in cognitive skills in students? *Computers in Human Behavior*, 29, 632-638.
- BADDELEY, A., GATHERCOLE, S. & PAPAGNO, C. (1998). The phonological loop as a language learning device. *Psychological Review*, 105 (1), 158-173.
- BADDELEY, A. D. & HITCH, G. J. (1974). Working memory. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (pp. 47-90). San Diego, CA: Academic Press.
- BARROUILLET, P., BERNARDIN, S. & CAMOS, V. (2004). Time constraints and resource sharing in adults' working memory spans. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133, 83-100.
- BOTVINICK, M. & WATANABE, T. (2007). From numerosity to ordinal rank: a gain-field model of serial order representation in cortical working memory. *Journal of Neuroscience*, 27 (32), 8636-8642.
- BURGESS, N. & HITCH, G. J. (2006). A revised model of short-term memory and long-term learning of verbal sequences. *Journal of Memory and Language*, 55, 627-652.
- CAMOS, V. & BARROUILLET, P. (2014). Attentional and non-attentional systems in the maintenance of verbal information in working memory: the executive and phonological loops. *Front Hum Neurosci*, 8, 900.
- CATROPPA, C., STONE, K., HEARPS, S. J., SOO, C., ANDERSON, V. & ROSEMA, S. (2015). Evaluation of an attention and memory intervention post-childhood acquired brain injury: Preliminary efficacy, immediate and 6 months post-intervention. *Brain Inj*, 29 (11), 1317-1324.
- CLOSSET, A. & MAJERUS, S. (2007). Rééducation de la mémoire phonologique à court terme : application chez un enfant de 10 ans. In G. Aubin, F. Coyette, P. Pradat-Diehl & C. Vallat-Azouvi (Eds.), *Neuropsychologie de la mémoire de travail* (pp. 323-349). Marseille : Solal.
- CHACKO, A., FEIRSEN, N., BEDARD, A. C., MARKS, D., UDERMAN, J. Z. & CHIMIKLIS, A. (2013). Cogmed Working Memory Training for youth with ADHD: a closer examination of efficacy utilizing evidence-based criteria. *J Clin Child Adolesc Psychol*, 42 (6), 769-783.

- CORTESE, S., FERRIN, M., BRANDEIS, D., BUITELAAR, J., DALEY, D., DITTMANN, R. W. & EUROPEAN, A. G. G. (2015). Cognitive training for attention-deficit/hyperactivity disorder: meta-analysis of clinical and neuropsychological outcomes from randomized controlled trials. *J Am Acad Child Adolesc Psychiatry*, 54 (3), 164-174.
- COWAN, N. (1995). *Attention and memory: An integrated framework*. New York: Oxford University Press.
- DUNNING, D. L., HOLMES, J. & GATHERCOLE, S. E. (2013). Does working memory training lead to generalized improvements in children with low working memory? A randomized controlled trial. *Dev Sci*, 16 (6), 915-925.
- FRANCIS, D., CLARK, N. & HUMPHREYS, G. (2003). The treatment of an auditory working memory deficit and the implications for sentence comprehension abilities in mild "receptive" aphasia. *Aphasiology*, 17 (8), 723-750.
- GATHERCOLE, S. E., ADAMS, A. M. & HITCH, G. J. (1994). Do young children rehearse? An individual-differences analysis. *Memory and Cognition*, 22, 201-207.
- GATHERCOLE, S. E. & ALLOWAY, T. P. (2006). Practitioner review: short-term and working memory impairments in neurodevelopmental disorders: diagnosis and remedial support. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 47 (1), 4-15.
- GIBSON, B. S., GONDOLI, D. M., KRONENBERGER, W. G., JOHNSON, A. C., STEEGER, C. M. & MORRISSEY, R. A. (2013). Exploration of an adaptive training regimen that can target the secondary memory component of working memory capacity. *Memory and Cognition*, 41 (5), 726-737.
- GIBSON, B. S., KRONENBERGER, W. G., GONDOLI, D. M., JOHNSON, A. C., MORRISSEY, R. A. & STEEGER, C. M. (2012). Component Analysis of Simple Span vs. Complex Span Adaptive Working Memory Exercises: A Randomized, Controlled Trial. *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, 1 (3), 179-184.
- GRAY, S. A., CHABAN, P., MARTINUSSEN, R., GOLDBERG, R., GOTLIEB, H., KRONITZ, R. & TANNOCK, R. (2012). Effects of a computerized working memory training program on working memory, attention, and academics in adolescents with severe LD and comorbid ADHD: a randomized controlled trial. *J Child Psychol Psychiatry*, 53 (12), 1277-1284.
- HARRIS, L., OLSON, A. & HUMPHREYS, G. (2014). The link between STM and sentence comprehension: A neuropsychological rehabilitation study. *Neuropsychological Rehabilitation*, 24 (5), 678-720.
- HOLMES, J., BUTTERFIELD, S., CORMACK, F., VAN LOENHOUD, A., RUGGERO, L., KASHIKAR, L. & GATHERCOLE, S. (2015). Improving working memory in children with low language abilities. *Front Psychol*, 6, 519.
- HOLMES, J., GATHERCOLE, S. E. & DUNNING, D. L. (2009). Adaptive training leads to sustained enhancement of poor working memory in children. *Developmental Science*, 12 (4), F9-15.
- HOLMES, J., GATHERCOLE, S. E., PLACE, M., DUNNING, D. L., HILTON, K. & ELLIOTT, J. G. (2010). Working memory deficits can be overcome: impacts of training and medication on working memory in children with ADHD. *Applied Cognitive Psychology*, 24, 827-836.
- HULME, C., MAUGHAN, S. & BROWN, G. D. (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, 685-701.
- JOLLES, D. D., GROL, M. J., VAN BUCHEM, M. A., ROMBOUTS, S. A. & CRONE, E. A. (2010). Practice effects in the brain: Changes in cerebral activation after working memory practice depend on task demands. *Neuroimage*, 52 (2), 658-668.
- KAISER, D., STEIN, T. & PEELEN, M. V. (2015). Real-world spatial regularities affect visual working memory for objects. *Psychon Bull Rev*, 22 (6), 1784-1790.
- KALINYAK-FLISZAR, M., KOHEN, F. & MARTIN, N. (2011). Remediation of language processing in aphasia: Improving activation and maintenance of linguistic representations in (verbal) short-term memory. *Aphasiology*, 25 (10), 1095-1131.
- KLINGBERG, T., FERNELL, E., OLESEN, P. J., JOHNSON, M., GUSTAFSSON, P., DAHLSTROM, K. & WESTERBERG, H. (2005). Computerized training of working memory in children with ADHD--a randomized, controlled trial. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 44 (2), 177-186.
- KLINGBERG, T., FORSSBERG, H. & WESTERBERG, H. (2002). Training of working memory in children with ADHD. *J Clin Exp Neuropsychol*, 24 (6), 781-791.
- KOENIG-BRUHIN, M. & STUDER-EICHENBERGER, F. (2007). Therapy of short-term memory disorders in fluent aphasia: A single case study. *Aphasiology*, 21 (5), 448-458.
- MAJERUS, S. (2013). Language repetition and short-term memory: An integrative framework. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 357.
- MAJERUS, S. (2016). La Rééducation de la mémoire à court terme. In X. Seron & M. van der Linden (Eds.). *Traité de neuropsychologie clinique – Tome 2 (2^e édition)* (en préparation). Paris : Solal-De Boeck.
- MAJERUS, S., ATTOU, L., ARTIELLE, M. A. & VAN DER KAA, M. A. (2015). The heterogeneity of verbal short-term memory impairment in aphasia. *Neuropsychologia*, 77, 165-176.
- MAJERUS, S., VAN DER KAA, M. A., RENARD, C., VAN DER LINDEN, M. & PONCELET, M. (2005). Treating verbal short-term memory deficits by increasing the duration of temporary phonological representations: A case study. *Brain and Language*, 95 (1), 174-175.
- MAJERUS, S. & VAN DER LINDEN, M. (2003). The development of long-term memory effects on verbal short-term memory: A replication study. *British Journal of Developmental Psychology*, 21, 303-310.
- MAJERUS, S., VAN DER LINDEN, M., PONCELET, M. & METZ-LUTZ, M. N. (2004). Can phonological and semantic short-term memory be dissociated? Further evidence Landau-Kleffner Syndrome. *Cognitive Neuropsychology*, 21 (5), 491-512.
- MARTIN, N. & SAFFRAN, E. M. (1992). A computational account of deep dysphasia: Evidence from a single case study. *Brain and Language*, 43, 240-274.
- MARTINEZ PEREZ, T., MAJERUS, S. & PONCELET, M. (2013). Impaired short-term memory for order in adults with dyslexia. *Research in Developmental Disabilities*, 34, 2211-2223.
- MELBY-LERVAG, M. & HULME, C. (2013). Is working memory training effective? A meta-analytic review. *Dev Psychol*, 49 (2), 270-291.
- OLESEN, P. J., WESTERBERG, H. & KLINGBERG, T. (2004). Increased prefrontal and parietal activity after training of working memory. *Nature Neuroscience*, 7, 75-79.
- PAGE, M. P. A. & NORRIS, D. (1998). The Primacy model: A new model of immediate serial recall. *Psychological Review*, 105 (4), 761-781.
- PASSOLUNGHI, M. C. & COSTA, H. M. (2016). Working memory and early numeracy training in preschool children. *Child Neuropsychol*, 22 (1), 81-98.
- PATTERSON, K. E., GRAHAM, N. & HODGES, J. R. (1994). The impact of semantic memory loss on phonological representations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 6, 57-69.
- PEIJNENBORGH, J. C., HURKS, P. M., ALDENKAMP, A. P., VLES, J. S. & HENDRIKSEN, J. G. (2015). Efficacy of working memory training in children and adolescents with learning disabilities: A review study and meta-analysis. *Neuropsychol Rehabil*, 1-28.
- RABIPOUR, S. & RAZ, A. (2012). Training the brain: fact and fad in cognitive and behavioral remediation. *Brain and Cognition*, 79 (2), 159-179.
- RAPPORT, M. D., ORBAN, S. A., KOFLER, M. J. & FRIEDMAN, L. M. (2013). Do programs designed to train working memory, other executive functions, and attention benefit children with ADHD? A meta-analytic review of cognitive, academic, and behavioral outcomes. *Clin Psychol Rev*, 33 (8), 1237-1252.
- SWANSON, H. L., KEHLER, P. & JERMAN, O. (2010). Working memory, strategy knowledge, and strategy instruction in children with reading disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 43 (1), 24-47.

- VALLAT, C., AZOUVI, P., HARDISSON, H., MEFFERT, R., TESSIER, C. & PRADAT-DIEHL, P. (2005). Rehabilitation of verbal working memory after left hemisphere stroke. *Brain Injury*, 19 (13), 1157-1164.
- VALLAT-AZOUVI, C., PRADAT-DIEHL, P. & AZOUVI, P. (2009). Rehabilitation of the central executive of working memory after severe traumatic brain injury: two single-case studies. *Brain Injury*, 23 (6), 585-594.
- VAN DER DONK, M., HIEMSTRA-BEERNINK, A. C., TJEENK-KALFF, A., VAN DER LEIJ, A. & LINDAUER, R. (2015). Cognitive training for children with ADHD: a randomized controlled trial of cogmed working memory training and 'paying attention in class'. *Frontiers in Psychology*, 6, 1081.
- VAN DIJCK, J.-P., ABRAHAMSE, E. L., MAJERUS, S. & FIAS, W. (2013). Spatial attention interacts with serial order retrieval in verbal working memory. *Psychological Science*, 24, 1854-1859.
- VON BASTIAN, C. & OBERAUER, K. (2013). Effects and mechanisms of working memory training: a review. *Psychological Research*, 1-18.
- WASS, S. V., SCERIF, G. & JOHNSON, M. H. (2012). Training attentional control and working memory - is younger, better? *Developmental Review*, 32, 360-387.