

Le développement de la mémoire de travail : perspectives dans le cadre du modèle de partage temporel des ressources

CAMOS, V., BARROUILLET, Pierre Noël

Reference

CAMOS, V., BARROUILLET, Pierre Noël. Le développement de la mémoire de travail : perspectives dans le cadre du modèle de partage temporel des ressources. *Psychologie française*, 2014, vol. 59, no. 1, p. 21-39

DOI : 10.1016/j.psfr.2012.12.003

Available at:

<http://archive-ouverte.unige.ch/unige:88201>

Disclaimer: layout of this document may differ from the published version.



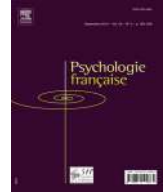
**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**



Disponible en ligne sur www.sciencedirect.com

SciVerse ScienceDirect

et également disponible sur www.em-consulte.com



Article original

Le développement de la mémoire de travail : perspectives dans le cadre du modèle de partage temporel des ressources

The development of working memory: The time-based resource sharing approach

V. Camos^{a,*}, P. Barrouillet^b

^a Département de psychologie, université de Fribourg, rue de Faucigny 2, 1700 Fribourg, Suisse

^b FPSE, université de Genève, 40, boulevard du Pont d'Arve, 1211 Genève 4, Suisse

IN F O A R T I C L E

Historique de l'article :

Reçu le 27 mars 2012

Accepté le 24 décembre 2012

Mots clés :

Développement cognitif

Mémoire de travail

Contrôle exécutif

R É S U M É

La mémoire de travail joue un rôle central dans le développement cognitif et sa capacité est le meilleur prédicteur des performances dans les activités cognitives complexes et les apprentissages scolaires. Dans le cadre de notre modèle du partage temporel des ressources, trois facteurs principaux sont responsables du développement des capacités de la mémoire de travail. Dans cet article, nous synthétisons les principaux résultats illustrant l'impact de deux de ces facteurs sur le développement, montrant ainsi comment l'accroissement de la quantité d'attention et l'efficacité croissante du mécanisme d'alternance attentionnelle peuvent expliquer le développement des capacités de mémoire de travail.

© 2013 Publié par Elsevier Masson SAS pour la Société française de psychologie.

A B S T R A C T

Working memory has a central role in cognitive development and its capacity is among the best predictors of high-level cognition and school achievement. Within the Time-Based Resource Sharing (TBRS) model, three main factors account for the development of working memory capacity. In this paper, we will review the main empirical evidence sustaining the impact of two of these factors on

Keywords:

Cognitive development

Working memory

Executive control

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : valerie.camos@unifr.ch (V. Camos).

cognitive development. First, the amount of attention available for cognitive functioning might increase during childhood. Thus, for the same activities, older children would be able to process information faster than younger children. Within working memory span tasks, because the level of activation of memory traces decreases during the processing steps, any reduction of the duration of these steps directly diminishes the time during which the traces decay, and consequently increases the time available for reactivation or refreshing before the next processing step. These two effects jointly induce a stronger activation of the memory traces and a better recall of the to-be-maintained items. Second, because the main hypothesis of the TBRS model is that attention switches to refresh memory traces from processing to maintenance during the processing episodes, the efficiency of the refreshing mechanism should have a direct and strong impact on working memory functioning. An increase in the efficiency of this refreshing during childhood means that older children should take a greater advantage from the short pauses left free between each processing step. The level of activation of the memory traces would be then higher for older than for younger children, resulting in the classically observed increase in span. As a consequence, age-related changes in the efficiency of the refreshing could play a central role in working memory development.

© 2013 Published by Elsevier Masson SAS on behalf of Société française de psychologie.

Depuis les travaux princeps de [Baddeley et Hitch \(1974\)](#), la notion de mémoire de travail n'a cessé d'occuper une place toujours plus importante en psychologie. Concevant la pensée comme un processus de formation, de stockage et de manipulation de représentations symboliques, l'approche cognitiviste rendait nécessaire la conception d'un système central dévolu aux traitements et au maintien simultanés des représentations sur lesquelles ces traitements s'exercent. En tant que centre exécutif du système cognitif, la psychologie contemporaine considère que la mémoire de travail joue un rôle essentiel dans les activités dites contrôlées, par opposition aux activités réputées automatiques, son contenu recouvrant celui de notre conscience et constituant la toile de fond de notre activité mentale. Ainsi, les limitations manifestes de la pensée humaine dans les activités de raisonnement, de résolution de problème, ou de compréhension ont été attribuées aux capacités limitées de la mémoire de travail, les variations individuelles de cette capacité sous-tendant une part importante des variations observées entre les individus dans ces activités (pour une synthèse en français voir [Gavens & Camos, 2006, 2007](#)). De nombreuses études ont donc préféré évoquer des différences en capacité de mémoire de travail pour expliquer des variations interindividuelles lors de tâches cognitives, plutôt que d'invoquer des différences d'intelligence, concept jugé souvent trop flou ([Kyllonen & Christal, 1990](#)). Parce que les capacités en mémoire de travail sont de bons prédicteurs des apprentissages chez l'enfant ([Barrouillet, Camos, Morlaix & Suchaut, 2008](#) ; [Lépine, Barrouillet, & Camos, 2005](#)), les théories du développement voient dans l'accroissement avec l'âge de ces capacités un des facteurs essentiels du développement cognitif (pour une synthèse, [Barrouillet & Camos, 2007a](#)). Le but de cet article est de présenter l'un des modèles les plus récents de mémoire de travail, le modèle de partage temporel des ressources, afin de dégager les facteurs expliquant l'accroissement des capacités de mémoire de travail au cours du développement.

1. Le modèle de partage temporel des ressources

La mémoire de travail est conçue comme une structure permettant le maintien et le traitement d'information. Le modèle standard de mémoire de travail est celui proposé par [Baddeley et Hitch \(1974 ; Baddeley, 1986, 2012\)](#) qui suggèrent une distinction structurelle entre les sous-systèmes dédiés au stockage, d'une part, et une entité distincte en charge du contrôle exécutif de la cognition, d'autre part. Depuis l'apparition de ce premier modèle, des conceptions alternatives ont été proposées, telles

que celle d'Engle ou de Cowan (Cowan, 2005 ; Engle & Kane, 2004). Toutefois, ces théories ont hérité de leur prédécesseur l'hypothèse forte d'une entité distincte chargée de contrôler le fonctionnement de la mémoire de travail. Au sein de la mémoire de travail, ce centre exécutif est l'entité la moins étudiée. Baddeley (1986) le décrit comme un système superviseur attentionnel en charge des fonctions exécutives qui contrôlent, régulent et planifient l'activité cognitive. Cependant, au-delà d'une conception le rapprochant d'un homoncule, le fonctionnement du centre exécutif et son rôle dans le maintien des informations demeurent largement ignorés.

Nous avons récemment proposé un nouveau modèle de mémoire de travail nommé le modèle de partage temporel des ressources ou en anglais *time-based resource sharing model* (TBRS) (Barrouillet, Bernardin, & Camos, 2004 ; Barrouillet, Bernardin, Portrat, Vergauwe, & Camos, 2007 ; Barrouillet & Camos, 2007b ; Barrouillet, Portrat, & Camos, 2011). Ce modèle est basé sur quatre propositions principales et suggère une conception nouvelle des relations entre la mémoire de travail et le contrôle exécutif (Barrouillet & Camos, 2010).

Tout d'abord, le modèle suppose que dans la plupart des tâches d'empan complexe, tâches prototypiques pour l'étude de la mémoire de travail¹, le traitement et le maintien de l'information au sein de la mémoire de travail reposent sur une même ressource limitée, l'attention. C'est le cas pour les traitements complexes telles que la lecture de phrases, le comptage de points, ou la résolution d'équations arithmétiques qui sont fréquemment utilisés comme composants de traitement au sein des tâches traditionnelles de mémoire de travail. Ces activités complexes impliquent le maintien de buts et de résultats intermédiaires, la sélection fréquente d'informations pertinentes et de réponses ainsi que des récupérations en mémoire à long-terme, autant de processus qui requièrent de l'attention (Conway, Kane, & Engle, 2003 ; Engle, Kane, & Tuholski, 1999 ; Kane & Engle, 2003). C'est également le cas pour des traitements plus simples comme la lecture de lettres ou de chiffres, qui demandent également de l'attention pour récupérer les connaissances déclaratives pertinentes en mémoire à long-terme (Anderson, 1993 ; Anderson & Lebière, 1998 ; Logan, 1988). Ainsi, le traitement comme le maintien de l'information nécessitent de l'attention. Celle-ci est supposée être une ressource cognitive limitée qui doit par conséquent être partagée. Ces limitations concernent l'attention impliquée dans les processus volontairement contrôlés, c'est-à-dire une « attention contrôlée » comme la dénomme Engle et al. (1999), ou une « attention dirigée par l'administrateur central » comme dans le modèle de Cowan (1999).

La seconde hypothèse du modèle TBRS est que chaque traitement élémentaire impliqué dans les composants de traitement ou de maintien de l'information se déroule de façon séquentielle. Ainsi, chaque étape de traitement doit être achevée avant la mise en œuvre de l'étape suivante. Cette forte contrainte qui pèse sur le fonctionnement cognitif peut être indifféremment décrite comme attentionnelle, l'attention ne pouvant sélectionner qu'un seul élément de connaissance à un moment donné (Garavan, 1998 ; Oberauer, 2002, 2005), ou comme une limitation centrale de la cognition, les processus cognitifs étant limités par un goulet d'étranglement (*central bottleneck*) s'appliquant à une variété d'opérations mentales telles que la sélection de réponse ou la récupération en mémoire à long-terme (Pashler, 1998). Le point principal est que, lorsque le focus attentionnel ou le goulet d'étranglement sont occupés par un épisode de traitement, ils ne sont plus disponibles pour aucun autre traitement, et en particulier pour les processus liés au maintien actif des éléments de mémoire.

La troisième hypothèse est que les traces mémorielles sur lesquelles l'attention se concentre reçoivent de l'activation, mais, dès que l'attention est déplacée, cette activation souffre d'une dégradation liée au temps (Barrouillet & Camos, 2009 ; Barrouillet, Portrat, Vergauwe, Diependaele, & Camos, 2011 ; Barrouillet, De Paepe, & Langerock, 2012 ; Cowan, 1995, 1999 ; Portrat, Barrouillet, & Camos, 2008 ; Towse & Hitch, 1995). Par conséquent, dans les tâches d'empan complexe mais aussi dans le fonctionnement de la mémoire de travail en général, les traces mnésiques doivent être activement

¹ Les tâches d'empan complexe nécessitent le maintien d'informations pour un rappel ultérieur (tâche principale) pendant la résolution d'une tâche secondaire. La première tâche d'empan complexe a été créée par Daneman et Carpenter (1980). Elle nécessite de lire des phrases afin de les comprendre tout en maintenant le dernier mot de chacune d'elles. Après la présentation de plusieurs phrases, on demande au sujet de rappeler les mots dans l'ordre de présentation. Depuis lors, de nombreuses autres tâches d'empan complexe ont été créées, comme les très classiques tâche d'empan d'opérations de Turner et Engle (1989), ou la tâche d'empan de comptage de Case et al. (1982).

maintenues avant de disparaître lorsque l'attention est occupée par un traitement. Le rafraîchissement de ces traces avant leur disparition complète s'opère par leur réactivation ou leur reconstruction. Il est à noter que cette réactivation n'implique pas nécessairement le processus de répétition articulatoire que Baddeley décrit dans son modèle de la boucle phonologique (Baddeley, 1986 ; Baddeley & Logie, 1999), mais plutôt, comme l'a montré Cowan (1992), un processus de récupération rapide grâce à une refocalisation attentionnelle. Ce mécanisme de réactivation par focalisation attentionnelle est indépendant de la répétition articulatoire (Camos, Lagner et Barrouillet, 2009 ; Camos, Mora, & Oberauer, 2011) et peut s'appliquer à des items aussi bien verbaux que visuospatiaux (Vergauwe, Camos, & Barrouillet, 2009, 2010). Ce genre de rafraîchissement peut avoir lieu même pendant de courtes pauses qui pourraient survenir pendant le traitement en cours. Ce mécanisme est semblable à celui décrit par Johnson comme une fonction exécutive minimale (Johnson, 1992 ; Raye, Johnson, Mitchell, Greene & Johnson, 2007 ; Raye, Johnson, Mitchell, Reeder, & Greene, 2002).

La quatrième hypothèse est qu'en raison de la limitation de l'attention et du déclin temporel des traces en mémoire lorsqu'elles sont hors du *focus* attentionnel, le partage de l'attention n'est possible que par un processus rapide et incessant d'alternance (ou *switching*) de l'attention entre le traitement et le maintien. Cette alternance rapide de l'attention peut se produire au cours d'un traitement. Une tâche donnée, aussi exigeante soit elle, induit rarement une capture continue de l'attention. Au contraire, l'attention peut être fréquemment détournée, même pour de courtes périodes de temps, vers d'autres pensées, puis ramenée à l'activité en cours. Cette alternance continue de l'attention soutient notre expérience phénoménale de la pensée et assure la cohérence de notre vie mentale au-delà de la succession incessante d'idées. Cette conception de la mémoire de travail définit à son tour une nouvelle conception de la charge cognitive qui s'écarte des conceptions plus traditionnelles qui assimilent la charge cognitive à la complexité (Barrouillet, Lépine, & Camos, 2008 ; Lépine, Bernardin, & Barrouillet, 2005). Comme nous l'avons noté précédemment, la composante de traitement des tâches traditionnelles d'empan complexe implique des activités complexes telles que la lecture des phrases, le comptage de points parmi des distracteurs, la résolution d'équations complexes ou encore le raisonnement. L'utilisation de telles activités complexes est justifiée par l'hypothèse d'un partage des ressources entre le traitement et le stockage tel que proposé par Case (1985). Selon cette conception, les activités complexes sont particulièrement consommatrices en ressources cognitives ou attentionnelles. Elles entrent donc en conflit avec le maintien simultané d'informations (nous présenterons plus loin en détail cette conception de partage des ressources). Ainsi, plus la composante de traitement est complexe et exigeante, plus la tâche de mémoire de travail est fiable et de meilleure qualité².

Le modèle TBRS s'écarte de cette conception car il suppose que la charge cognitive impliquée dans une activité ne dépend ni de sa complexité ni de sa durée totale. Toute tâche qui capte l'attention durant des périodes prolongées aurait un effet extrêmement préjudiciable sur le maintien simultané de l'information parce qu'elle empêche le rafraîchissement des traces mnésiques dont l'activation décline au cours du temps. Pour le modèle TBRS, la charge cognitive correspond donc à la proportion de temps pendant laquelle une tâche capte l'attention et entrave les activités simultanées qui nécessitent des processus centraux telles que le rafraîchissement des traces mnésiques. La charge cognitive correspondrait ainsi au rapport entre la durée de la capture attentionnelle et le temps total pour exécuter la tâche. Il est important de noter qu'il n'est pas nécessaire que les tâches secondaires utilisées dans les tâches d'empan complexe impliquent elles-mêmes une forte charge cognitive. Des activités très simples telles que la lecture de chiffres peuvent bloquer efficacement l'attention de manière prolongée si elles sont réalisées sous contraintes temporelles (Lépine, Bernardin, & Barrouillet, 2005). Cette conception de la charge cognitive a été testée par Barrouillet et al. (2004) en utilisant une nouvelle tâche de mémoire de travail nommée « la tâche d'empan de lecture de chiffres » dans laquelle les participants devaient maintenir et rappeler une série de lettres de longueur croissante tout en lisant des chiffres. Les stimuli étaient présentés sur des écrans successifs affichant soit une lettre à

² En fait, nous avons montré que nos tâches d'empan complexe qui incluent des traitements très simples peuvent être de meilleurs prédicteurs des activités cognitives de haut niveau que les tâches classiques. Par exemple, elles sont de meilleurs prédicteurs des performances scolaires aux Évaluations Nationales de sixième ou de CE2 (Barrouillet et al., 2008 ; Lépine, Barrouillet, & Camos, 2005).

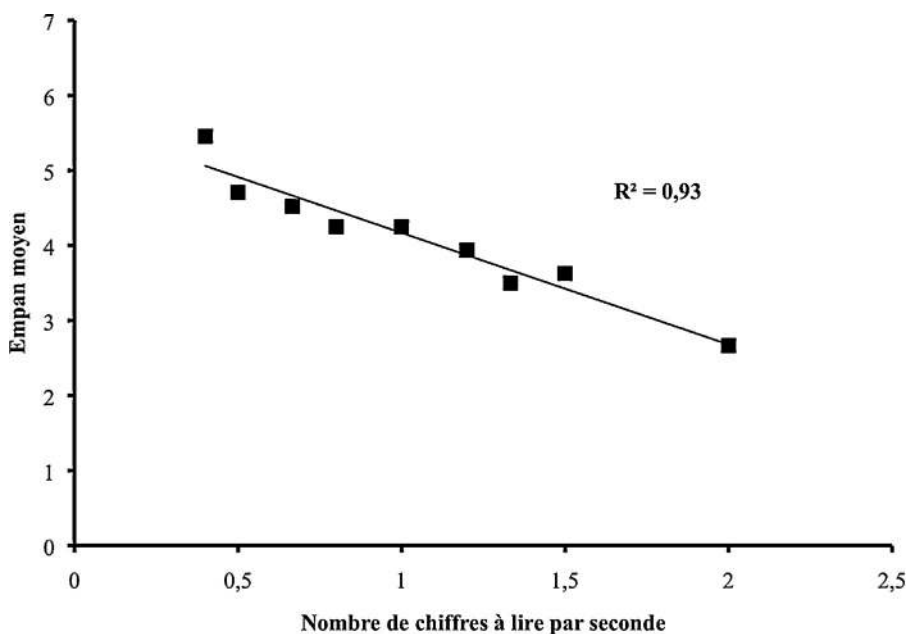


Fig. 1. Empan moyen en fonction du coût cognitif de la tâche de lecture de chiffres défini en termes de nombre de chiffres à lire par seconde (Barrouillet et al., 2004, Exp. 7).

mémoriser soit un chiffre à lire. Après chaque lettre, les chiffres étaient présentés successivement à un rythme fixe. Le nombre de chiffres présentés après chaque lettre ainsi que le temps total alloué à leur lecture (i.e. l'intervalle inter-lettre) étaient manipulés afin de faire varier la charge cognitive de la tâche secondaire (Fig. 1).

Selon le modèle TBRS, les performances de rappel devraient être une fonction inverse de la charge cognitive impliquée par la tâche de lecture de chiffres. En effet, la charge cognitive étant la proportion de temps pendant lequel l'activité occupe l'attention, toute augmentation de cette proportion devrait réduire la possibilité de détourner l'attention du traitement pour rafraîchir les traces mnésiques. Ainsi, l'augmentation du nombre de chiffres à lire dans un période de temps déterminée, ou la réduction du temps imparti pour lire un nombre donné de chiffres devrait se traduire par une difficulté accrue du rafraîchissement des traces mnésiques et donc une diminution des scores de rappel (i.e., des empan plus faibles). C'est exactement ce que Barrouillet et al. (2004, Exp. 7) ont observé. Comme le montre la Fig. 1, les empan sont fortement corrélés avec la charge cognitive définie par le rapport entre le nombre de chiffres à lire et le temps alloué pour les lire, révélant une fonction linéaire entre le traitement et le stockage. Une telle relation linéaire entre les empan et la charge cognitive de la tâche secondaire a également pu être mise en évidence chez des enfants de dix ans (Portrat, Camos, & Barrouillet, 2009) et chez des enfants en difficulté scolaire (Corbin, Moissenet, & Camos, 2012).

Dans une série ultérieure d'expériences, Barrouillet et al. (2007) ont montré que la nature du traitement impliqué dans les tâches d'empan complexe ne modifiait pas la relation entre stockage et traitement. Par exemple, lorsque l'on compare deux tâches d'empan dans lesquelles le traitement est soit un jugement de parité de chiffres, soit un jugement de localisation d'un point sur l'écran, une même relation linéaire entre le rappel et la charge cognitive est observée. De même, lorsque l'on compare différentes tâches d'empan complexe variant par le type de fonction exécutive impliquée dans la composante de traitement (mise à jour, sélection de réponse, inhibition ou récupération), nous constatons une relation unique entre la charge cognitive de la tâche secondaire et la capacité de stockage (Barrouillet, Portrat, & Camos, 2011 ; Fig. 2 ; voir également pour l'étude du *switching* entre

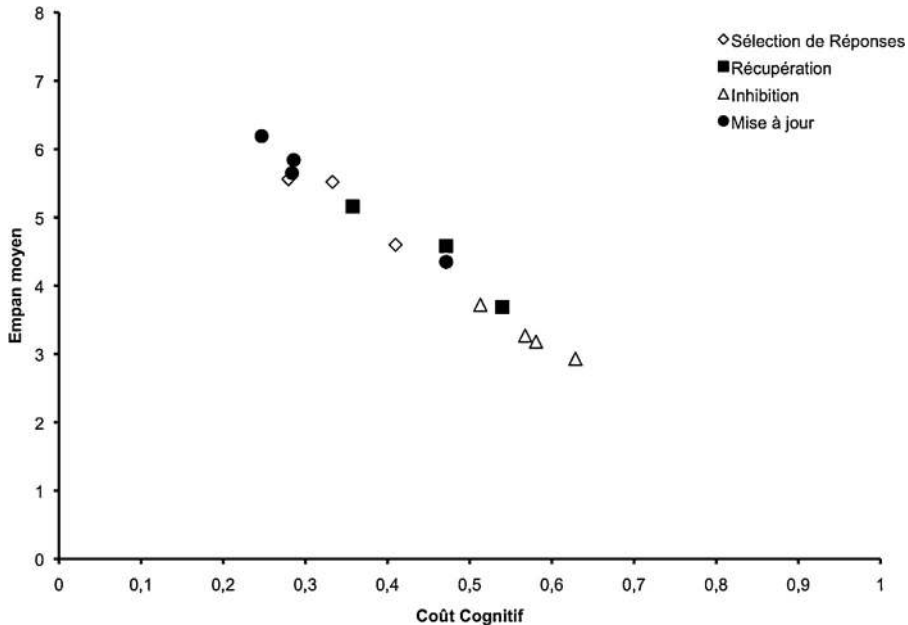


Fig. 2. Empan moyen en fonction du coût cognitif de la tâche secondaire (Barrouillet, Portrat, & Camos, 2011).

tâches, Liefoghe, Barrouillet, Vandierendonck, & Camos, 2008). Cependant, comme prévu par le TBRS, cette relation n'est observée que si le traitement demande de l'attention, comme pour une tâche de temps de réaction de choix. Quand cette demande est quasiment nulle, comme c'est le cas pour une tâche temps de réaction simple (*simple reaction time* [SRT]), la capacité de stockage concurrente reste inchangée même si le nombre de SRT à effectuer augmente (Barrouillet et al., 2007).

2. Les facteurs explicatifs du développement de la mémoire de travail

De nombreux auteurs ont fait valoir que le développement cognitif résulte principalement de l'augmentation avec l'âge de ressources cognitives ou attentionnelles. Ainsi, les performances cognitives des enfants dépendraient de la quantité d'informations qu'ils peuvent maintenir présentes à l'esprit à un moment donné, cette capacité augmentant avec l'âge. Par exemple, Pascual-Leone (1970) a introduit la notion de puissance mentale qui peut être comprise comme le nombre maximal d'actions mentales que les enfants peuvent coordonner, la puissance mentale augmentant de 1 à 7 de la petite enfance à l'adolescence. De la même manière, Halford (1993) suggère que la performance cognitive dépend du nombre de dimensions indépendantes qui peuvent être simultanément saisies, ce nombre augmentant avec l'âge. Toutefois, on peut noter que ces concepts demeurent vagues et évoquent des « capacités » abstraites et mal définies.

Ainsi, des tentatives ont été faites pour clarifier le locus du développement de la capacité en mémoire de travail. Case (1985) a ainsi suggéré de considérer la mémoire de travail comme un espace total de traitement, de taille fixe, qui se partagerait en un espace consacré aux traitements comme ceux impliqués dans la tâche secondaire des tâches d'empan complexe, et un espace de stockage à court-terme disponible pour maintenir les éléments devant être rappelés. Afin de tester cette hypothèse de partage des ressources, i.e. d'un partage de l'espace total de traitement, Case (1985) a créé une tâche dite d'empan de comptage, dans laquelle les participants comptent à haute voix des points présentés sur des cartes puis rappellent le nombre de points présents sur chaque carte. L'expérimentateur fait varier le nombre de cartes, et par conséquent le nombre de valeurs à rappeler à la fin. Case, Kurland, et Goldberg (1982) ont observé que le nombre de valeurs rappelées (i.e.,

l'empan) augmente avec l'âge. Néanmoins, des adultes à qui on a enseigné un langage imaginaire avant l'expérience et qui doivent l'utiliser au lieu de la séquence traditionnelle des chiffres dans la tâche d'empan de comptage obtiennent des scores de rappel équivalents à ceux d'enfants de six ans. Pour les auteurs, l'augmentation des performances de rappel avec l'âge serait due à une amélioration de l'efficacité du comptage, lequel exigerait une proportion toujours plus réduite de l'espace total de traitement avec l'âge, permettant ainsi la libération de plus d'espace pour le stockage. Lorsque le comptage est rendu difficile chez les adultes par l'utilisation d'une langue nouvelle, la part de l'espace total de traitement dédiée au comptage s'accroît, réduisant proportionnellement l'espace de stockage et ramenant leurs performances de rappel au niveau de celles de jeunes enfants.

Malgré ces travaux, la nature précise de la relation entre traitement et stockage est restée sujette à débat. Ainsi, [Towse et Hitch \(1995\)](#) ont proposé une hypothèse alternative de « déclin mémoriel » afin de rendre compte de l'accroissement de la capacité de la mémoire de travail avec l'âge. Selon cette hypothèse, les performances de rappel dans les tâches d'empan complexe seraient dues au fait que les traces mnésiques des items à rappeler souffrent d'une dégradation liée au temps, i.e., d'un déclin mémoriel. Lors de l'exécution des tâches d'empan complexe, les participants doivent détourner leur attention du stockage vers la tâche concurrente à effectuer. Leurs performances de rappel vont donc dépendre de la durée de ce traitement concurrent, qui détermine en fait la période pendant laquelle les traces mnésiques s'estompent. L'augmentation des performances de rappel liée à l'âge résulterait principalement du fait que le comptage devient de plus en plus rapide chez les enfants plus âgés. En accord avec leur hypothèse, [Towse et Hitch \(1995\)](#) ont observé que le rappel ne dépend pas de la difficulté du comptage (par exemple, s'il y a ou non des distracteurs parmi les objets à compter), mais seulement de sa durée. [Towse, Hitch, et Hutton \(1998\)](#) ont étendu ces résultats en faisant varier la durée de la tâche secondaire dans des tâches d'empan complexe de lecture de phrases ou d'opérations. Ils ont observé que des durées de traitement plus longues entraînent une baisse des rappels. Ces résultats ont été reproduits par [Hitch, Towse, et Hutton \(2001\)](#) dans une étude longitudinale, et par [Towse, Hitch, et Hutton \(2000\)](#) chez des adultes. Ainsi, [Towse et Houston-Price \(2001\)](#) concluent que l'idée même de ressources est superflue pour comprendre l'accroissement des capacités de mémoire de travail. Toutefois, ces mêmes auteurs soulignent également que même si un vaste corpus de recherche est consacré aux tâches d'empan complexe chez les enfants, la production d'un modèle satisfaisant du développement de la mémoire de travail n'est, étonnamment, pas si simple ([Towse et al., 2007](#)). Par exemple, l'étude corrélative des performances de mémoire de travail chez les enfants effectuée par [Bayliss, Jarrold, Baddeley, Gunn, et Leigh \(2005\)](#) met en évidence la nature multi-factorielle du développement de la mémoire de travail. Ces auteurs ont identifié trois facteurs principaux considérés comme sous-tendant le développement de la mémoire de travail : l'efficacité des traitements, les capacités de stockage et les ressources centrales pouvant être décrites comme de l'attention contrôlée. En résumé, la recherche récente a identifié plusieurs facteurs qui pourraient expliquer l'augmentation développementale de la capacité de mémoire de travail.

Dans le modèle TBRS, [Barrouillet et al. \(2004\)](#) ont identifié trois facteurs principaux qui pourraient limiter le fonctionnement de la mémoire de travail et les performances dans les tâches d'empan complexe (voir également [Camos & Barrouillet, 2011a](#)). Ces facteurs pourraient aussi sous-tendre les changements développementaux et les différences interindividuelles. Le premier facteur est la quantité d'attention disponible qui fonctionne comme une source d'activation des éléments à maintenir et à traiter. Cette quantité limitée restreint le nombre d'éléments sur lesquels portent les activités de traitement et de maintien de l'information. Le second est l'efficacité du mécanisme d'alternance attentionnelle entre traitement et stockage, tandis que le troisième se rapporte au phénomène de déclin temporel des traces mnésiques. Ainsi, notre modèle suppose que les changements avec l'âge de ces trois facteurs pourraient contribuer au développement de la mémoire de travail.

Tout d'abord, comme déjà suggéré par certains auteurs comme [Pascual-Leone \(1970\)](#), la quantité d'attention disponible pour le fonctionnement cognitif pourrait augmenter au cours du développement. Ainsi, pour les mêmes activités, les enfants plus âgés seraient en mesure de traiter plus d'informations et plus rapidement que les jeunes enfants. Dans les tâches d'empan complexe, parce que le niveau d'activation des traces mnésiques diminue au cours des étapes de traitement, une réduction de la durée de ces étapes diminue directement le temps pendant lequel les traces mnésiques déclinent, et par conséquent augmente le temps disponible pour leur réactivation ou rafraîchissement

avant l'étape suivante de traitement. Ces deux effets induisent conjointement une plus grande activation des traces et un meilleur rappel. Deuxièmement, parce que l'hypothèse principale du modèle TBRS est qu'il existe un mécanisme d'alternance attentionnelle entre le traitement et le maintien à un niveau temporel de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes (par exemple, au cours des épisodes de traitement), l'efficacité de ce mécanisme devrait avoir un impact direct et important sur le fonctionnement de la mémoire de travail. Une augmentation de l'efficacité du processus d'alternance au cours du développement signifie que des enfants plus âgés devraient tirer un meilleur profit des courtes pauses laissées libres, et ainsi disponibles pour le rafraîchissement, entre chaque étape de traitement. Le niveau d'activation des traces mnésiques serait alors plus élevé pour les enfants plus âgés, entraînant l'augmentation des empan classiquement observée. En conséquence, les changements avec l'âge de l'efficacité de cette alternance pourraient jouer un rôle central dans le développement de la mémoire de travail. De la même manière, la vitesse à laquelle les traces mnésiques déclinent avec le temps devrait avoir une incidence sur leur récupération lors du rappel. Un ralentissement du déclin des traces mnésiques chez les enfants plus âgés devrait se traduire par une meilleure performance de rappel. Jusqu'à présent, nous avons exploré l'impact sur le développement de deux de ces facteurs, la quantité d'attention disponible et l'efficacité du mécanisme d'alternance attentionnelle, alors que Nelson Cowan a établi que la vitesse de déclin passif de l'information en mémoire à court-terme évolue avec l'âge (Cowan, Nugent, Elliott, & Sauls, 2000).

2.1. L'accroissement de la quantité d'attention

Pour notre première étude chez les enfants (Barrouillet & Camos, 2001), nous avons créé un paradigme contrôlé temporellement qui a ensuite été utilisé pour développer notre modèle chez les adultes. Les travaux de Towse et Hitch (1995 ; Towse, Hitch, & Hutton, 2002) rappelés ci-dessus ont mis en lumière l'idée que le délai de rétention entre la présentation des items à maintenir et leur rappel est un facteur déterminant pour comprendre le fonctionnement de la mémoire de travail. Dans notre première étude, nous avons donc comparé deux tâches d'empan complexe pour lesquelles la durée des épisodes de traitement était similaire, mais dont la demande attentionnelle différait. Ainsi, des enfants de neuf et 11 ans devaient maintenir des lettres alors qu'ils vérifiaient des opérations qui étaient intercalées entre la présentation des lettres. Cette tâche était comparée à une tâche dite de « baba span » où les problèmes arithmétiques avaient été remplacés par la simple répétition continue à voix haute de la syllabe « ba » pour une durée égale au temps moyen mis par les enfants pour vérifier les problèmes correspondants. Ainsi, le délai de rétention était parfaitement égalisé entre ces deux tâches, mais la vérification d'opérations impliquait une demande attentionnelle plus élevée que la simple répétition d'une syllabe. Outre l'augmentation attendue des performances de rappel entre neuf et 11 ans, les résultats établissaient clairement que les enfants rappelaient plus de lettres lorsqu'ils n'avaient qu'à répéter « ba » au lieu de vérifier des opérations. Cet effet, qui n'interagissait pas avec l'âge, constituait l'un de nos premiers arguments en faveur du rôle de l'attention dans le fonctionnement de la mémoire de travail, et nous a conduit à interpréter l'augmentation développementale des empan comme résultant d'une augmentation des ressources attentionnelles.

Cependant, alors que la vérification de problèmes arithmétiques comme « $4 + 7 + 8 = 19$ » induit une demande attentionnelle importante par rapport à la simple répétition d'une syllabe, la diminution résultante des empan était loin d'être spectaculaire (une diminution de 0,70 à neuf ans et de 0,42 à 11 ans). Cela suggérait que les enfants étaient capables de maintenir actives les traces mnésiques tout en résolvant des problèmes arithmétiques. Nous avons donc pensé qu'au lieu d'alterner leur attention des traitements au stockage et du stockage aux traitements comme le suggéraient Towse et al. (1998), à savoir au moment même où les lettres sont présentées ou lorsque les opérations apparaissent à l'écran, les enfants pouvaient déplacer leur attention afin de réactiver les traces mnésiques au cours même des traitements, et cela bien que la tâche de vérification d'opérations soit exigeante. Cette intuition est devenue l'une des principales hypothèses du modèle TBRS. En outre, il serait trop simpliste d'interpréter ces premiers résultats uniquement en termes d'une augmentation de l'attention disponible. L'effet de la demande attentionnelle suggéré par le modèle TBRS ne peut que partiellement rendre compte des empan de mémoire de travail des enfants. En effet, la tâche de vérification d'opérations doit être plus exigeante pour les jeunes enfants qui prennent donc plus de

temps pour vérifier les mêmes opérations que des enfants plus âgés. Ainsi, ces derniers bénéficient donc de durées de traitement et de délais de rétention plus courts. Pour clarifier cette question, [Gavens et Barrouillet \(2004 ; Exp. 1\)](#) ont comparé les performances d'élèves de CE2 et CM2 dans des tâches d'empan complexe lorsque la durée de la tâche secondaire est contrôlée et sa difficulté égalisée entre les groupes d'âge.

Dans la première expérience de [Gavens et Barrouillet \(2004\)](#), la demande attentionnelle et la durée totale de la tâche secondaire étaient manipulées dans un plan factoriel en présentant à des enfants de neuf et 11 ans soit une tâche d'opérations continues, soit un « baba span » avec des durées courtes ou longues. Dans la tâche d'opérations continues, les enfants devaient maintenir des lettres tout en résolvant des séries d'opérations simples. Après la présentation de chaque lettre, les enfants voyaient un chiffre (i.e. la racine de l'opération), suivi par une série de signes et d'opérandes (+1 ou -1) s'affichant successivement à l'écran à un rythme fixe. Les enfants devaient lire le chiffre ainsi que les paires signe-opérande et donner les réponses successives à haute voix. Par exemple, pour la série « 6 + 1 + 1 », les enfants disaient « six plus un sept plus un huit ». Chaque opération en continu contenait soit deux paires de signe-opérande pour une durée courte, soit quatre paires pour une longue durée. Dans la tâche de « baba span », les chiffres et les paires de signe-opérande étaient remplacés par la syllabe « ba » affichée à plusieurs reprises à l'écran à un rythme fixe de manière à ce que les enfants énoncent le même nombre de syllabes dans les deux tâches, ce qui égalisait la quantité de suppression articulatoire. Comme dans [Barrouillet et Camos \(2001, Exp. 3\)](#), outre un fort effet de l'âge, la performance de rappel était plus faible dans la tâche d'opérations continues que dans la tâche de « baba span », sans interaction avec l'âge. En outre, la durée courte conduisait à de meilleurs rappels que la durée longue, cet effet étant significatif pour la tâche d'opérations continues, mais pas dans le « baba span ». Cependant, cet effet de la durée était assez faible (7 % de la variance expérimentale) par rapport à l'effet de la demande attentionnelle (73 %). Ainsi, même lorsque les délais de rétention étaient parfaitement égalisés entre les deux tâches, les performances étaient beaucoup plus faibles pour la tâche d'opérations continues que pour le « baba span », ce qui suggère que la demande attentionnelle de la tâche secondaire a un impact majeur sur les empan de mémoire de travail. En outre, bien que la durée du traitement ait été maintenue constante à travers les âges, les enfants plus âgés surpassaient les plus jeunes. Les meilleurs empan des enfants plus âgés ne résulteraient donc pas entièrement de leurs traitements plus rapides et de délais de rétention plus courts, comme [Towse et Hitch \(1995\)](#) le supposaient. Toutefois, cette explication ne pouvait pas non plus être totalement écartée puisqu'en maintenant constante la durée de rétention, l'effet développemental sur les empan se trouvait réduit. Ainsi, l'augmentation des empan « baba » observée entre neuf et 11 ans dans cette expérience (de 2,32 à 2,93) était plus faible que celle observée dans [Barrouillet et Camos \(2001, Exp 3 ; de 2,26 à 3,25\)](#), où les jeunes enfants se trouvaient soumis à des périodes d'articulation concurrente plus longues que celles des enfants plus âgés. Cette réduction de l'effet de l'âge fournit une preuve que l'augmentation développementale des capacités de mémoire de travail pourrait être en partie expliquée par des délais de rétention plus courts chez les enfants plus âgés comme suggéré par [Towse et Hitch \(1995\)](#).

Une autre expérience de [Gavens et Barrouillet \(2004, Exp. 3\)](#) s'est donc focalisée sur cette question. Est-ce que l'augmentation avec l'âge des capacités de mémoire de travail est principalement due à un traitement plus rapide chez les enfants plus âgés comme suggéré par [Towse et Hitch \(1995\)](#), à une augmentation de l'efficacité du traitement comme proposé par [Case \(1985\)](#), ou à une augmentation de la quantité de capacité cognitive comme le suggèrent [Swanson \(1996\)](#) ou [Halford, Wilson et Philipps \(1998\)](#) ? Pour répondre à cette question, des enfants de neuf et 11 ans ont effectué des tâches d'opérations continues dans lesquelles les traitements à réaliser avaient le même niveau de difficulté et la même durée dans les deux groupes d'âge. La tâche d'opérations continues précédemment utilisée par [Gavens et Barrouillet \(2004 ; Exp. 1\)](#) a été modifiée de telle sorte que soit trois soit quatre paires de signe-opérandes étaient présentées entre deux lettres aux enfants de neuf et 11 ans respectivement, pour une même durée totale de neuf secondes. Les auteurs avaient vérifié lors d'un pré-test que ces conditions conduisaient à un même pourcentage de réponses correctes dans les deux groupes d'âge. Encore une fois, la tâche d'opérations continues était comparée à une tâche de « baba span » où le même nombre de syllabes était prononcé (dix et 13 répétitions pour les enfants de neuf et 11 ans respectivement). Bien que la durée et la difficulté de la tâche secondaire soient maintenues constantes, l'hypothèse d'une augmentation de la capacité attentionnelle liée à l'âge prédit que les enfants plus

âgés doivent obtenir de meilleurs empanns que les enfants plus jeunes. De fait, les empanns moyens à la tâche d'opérations continues étaient significativement plus élevés pour les enfants de 11 ans que pour ceux de neuf ans, bien que cet effet développemental soit moins prononcé que dans la tâche de « baba span », comme en témoignait l'interaction significative âge \times tâche. Ces résultats fournissent des preuves solides du rôle de l'efficacité du traitement dans le développement des capacités de mémoire de travail. Comme Case (1985) l'a suggéré, le traitement qui devient de moins en moins exigeant avec l'âge laisse une part croissante des ressources cognitives disponibles pour le stockage. En conséquence, les différences développementales sont significativement réduites lorsque l'efficacité du traitement est égalisée au travers des âges. Toutefois, ce résultat suggère également qu'un autre facteur sous-tend le développement de la mémoire de travail, puisque les différences d'âge restent encore importantes dans la tâche d'opérations continues. Gavens et Barrouillet (2004) ont proposé que ce facteur serait une augmentation globale des ressources cognitives.

2.2. L'augmentation de l'efficacité du mécanisme d'alternance attentionnelle

Nous avons vu que la spécificité de notre modèle TBRS est le rôle de l'alternance de l'attention entre le traitement et le stockage. Comme nous l'avons suggéré plus haut, l'efficacité d'un tel mécanisme peut également participer à l'augmentation de la capacité de la mémoire de travail observée au cours du développement. Barrouillet, Gavens, Vergauwe, Gaillard, et Camos (2009) ont abordé cette question dans une série d'expériences.

2.2.1. Une efficacité croissante de l'alternance attentionnelle entre huit et 14 ans

L'objectif de la première expérience que nous avons effectuée chez les enfants âgés entre huit et 14 ans était double. Tout d'abord, nous avons cherché à montrer que le mécanisme d'alternance rapide entre le traitement et le stockage observé chez les adultes est également fonctionnel chez les enfants qui devraient être en mesure de profiter des pauses pendant le traitement pour rafraîchir les éléments à mémoriser. Deuxièmement, nous avons étudié les changements liés à l'âge de l'efficacité de ce processus de réactivation, les enfants plus âgés devant présenter une plus grande capacité à profiter des pauses pour rafraîchir et réactiver les traces mnésiques. Cette hypothèse conduit à la prédiction paradoxale que les enfants plus âgés devraient être plus affectés que les jeunes enfants par les variations de la charge cognitive de la tâche secondaire. Pour tester ces hypothèses, Barrouillet et al. (2009, Exp. 1) ont présenté à des enfants de huit à 14 ans la tâche d'empan de lecture de chiffres que nous avons décrite plus haut, dans laquelle les chiffres étaient présentés à quatre rythmes différents choisis parmi les neuf utilisées par Barrouillet et al. (2004, Exp 7) chez l'adulte et représentés sur la Fig. 1. Ainsi, dans les intervalles inter-lettres, les chiffres apparaissaient à un taux de 0,4, 0,8, 1,2 ou 2 chiffres par seconde.

Comme on peut le voir sur la Fig. 3, les résultats ont révélé deux phénomènes principaux. Tout d'abord, dans chaque groupe d'âge, les performances de rappel diminuaient alors que le rythme de la tâche secondaire (i.e., la charge cognitive) augmentait, et ceci même chez les enfants les plus jeunes. Un tel impact de la densité de l'activité concurrente sur le maintien en mémoire suggère que les enfants à tous ces âges ont profité du faible rythme de présentation des chiffres pour rafraîchir les traces mnésiques et obtenir un meilleur rappel. Deuxièmement, l'effet du rythme sur les empanns était plus important pour les enfants les plus âgés, ce qui suggère qu'ils étaient plus capable de détourner leur attention du traitement vers les activités de stockage alors que les jeunes enfants étaient probablement plus passifs. Ces résultats suggèrent que l'augmentation liée à l'âge des empanns de mémoire de travail dépend de la capacité à déplacer son attention des traitements au stockage. Toutefois, ces premiers résultats ne permettent pas d'écarter le rôle potentiel d'autres facteurs. Par exemple, une partie des différences développementales observées dans cette expérience pourrait résulter du fait que les enfants plus âgés étaient probablement plus rapides dans la lecture des chiffres, bénéficiant ainsi de plus de pauses pour rafraîchir les traces en mémoire. En conséquence, la charge cognitive impliquée dans la tâche secondaire, qui est la proportion de temps au cours de laquelle la lecture de chiffres occupe l'attention, était probablement plus faible chez les enfants plus âgés.

Afin d'évaluer le rôle potentiel de ce facteur, Barrouillet et al. (2009) ont conçu une seconde expérience dans laquelle les différences développementales liées à la vitesse de traitement (i.e., la vitesse

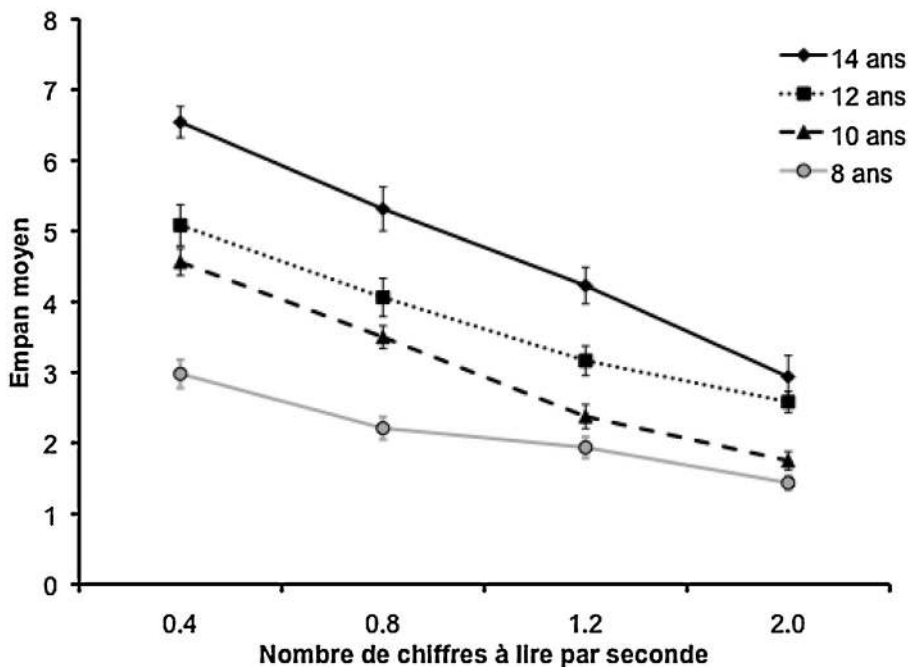


Fig. 3. Empan moyen en fonction du rythme de présentation des chiffres dans la tâche d'empan de lecture de chiffres chez des enfants de huit, dix, 12 et 14 ans (Barrouillet et al., 2009, Exp. 1).

de lecture des chiffres) ont été contrôlées. Dans ce but, nous avons utilisé la même tâche de lecture de chiffres, mais le temps disponible pour lire chaque chiffre a été adapté à la durée moyenne nécessaire pour lire les chiffres à chaque âge. Par souci de simplicité, l'expérience s'est concentrée sur les deux groupes d'âge extrêmes (huit et 14 ans). Les temps moyens de lecture des chiffres ont été évalués dans un test préalable sur deux groupes indépendants. Comme on pouvait s'y attendre, les enfants plus âgés étaient plus rapides que les plus jeunes (moyenne des temps de lecture : 489 ms et 622 ms respectivement). Trois niveaux de charge cognitive ont été créés en présentant chaque chiffre pour une durée équivalente à un, deux ou quatre fois le temps moyen de lecture (par exemple, pour un temps de lecture de 622 ms dans le pré-test, chaque chiffre est présenté 622 ms, 1244 ms, ou 2488 ms pour un niveau élevé, moyen et faible de charge cognitive, respectivement). Il est important de noter que, dans cette expérience, et contrairement à la précédente, le rythme de la tâche secondaire (i.e., le nombre de chiffres par seconde) variait entre les groupes d'âge parce que le temps disponible pour lire le même nombre de chiffres était plus long chez les jeunes que chez les enfants plus âgés. En revanche, la tâche de lecture de chiffres impliquait la même charge cognitive entre les groupes, parce que l'activité de lecture occupait la même proportion de l'intervalle inter-lettre (soit 100 %, 50 %, et 25 % pour un fort, moyen, et faible niveau de charge cognitive, respectivement).

Le modèle TBRS permet deux prédictions principales. Premièrement, bien que la charge cognitive de la tâche secondaire était la même dans les deux groupes d'âge, nous prédisions que les enfants plus âgés auraient de meilleurs rappels. Comme rappelé plus haut, Gavens et Barrouillet (2004) ont déjà observé que, même lorsque la difficulté de la tâche secondaire était égalisée au travers des âges, les enfants plus âgés surpassaient encore les plus jeunes. Les auteurs ont expliqué ce phénomène en supposant une augmentation avec l'âge des ressources cognitives conduisant à un niveau plus élevé de l'activation des éléments à mémoriser, ainsi qu'une réduction du temps de rétention, diminuant ainsi la dégradation des traces mnésiques. En conséquence, nous nous attendions à de meilleures performances de rappel chez les enfants plus âgés, même pour la charge cognitive élevée dans laquelle chaque chiffre était présenté pour une durée qui ne dépassait pas le temps nécessaire à sa lecture, et qui

donc entravait fortement la réactivation des traces mnésiques au cours du traitement. Deuxièmement, un effet de la charge cognitive était attendu avec une diminution des performances de rappel lorsque la charge cognitive augmentait, et ceci dans les deux groupes d'âge. Toutefois, notre hypothèse d'une amélioration liée à l'âge dans le processus de réactivation peut conduire à deux patterns de résultats différents. D'une part, on peut supposer que le développement de ce processus ne va pas au-delà de l'augmentation générale de la vitesse de traitement et de l'efficacité qui affecte la plupart des processus cognitifs tels que la récupération en mémoire, la rotation mentale, ou la recherche visuelle comme observé par [Kail \(2001\)](#). Dans ce cas, l'effet de la charge cognitive doit être le même dans les deux groupes d'âge parce que les différences de vitesse de traitement ont été contrôlées dans cette expérience. D'autre part, nous pouvons également supposer que le développement du processus de rafraîchissement va au-delà de l'augmentation générale de la vitesse de traitement. Par exemple, on peut supposer que le taux de réactivation est plus élevé chez les enfants plus âgés, non seulement parce qu'ils traitent l'information plus rapidement, mais aussi parce qu'ils ont une plus grande capacité à contrôler leur attention et sont donc plus en mesure de déplacer leur attention entre traitement et stockage. Dans ce cas, même avec ce contrôle des différences de vitesse de traitement, notre paradigme devrait révéler un effet plus faible de la charge cognitive chez les jeunes enfants qui seraient moins en mesure de profiter des pauses résultant de la faible charge cognitive.

Comme observé précédemment, les empan moyens étaient plus élevés chez les enfants de 14 ans (2,88 vs. 1,80 chez les enfants de huit ans) et la charge cognitive avait un effet significatif sur les empan. Bien que l'écart entre les performances des deux groupes augmentait de façon constante alors que la charge cognitive diminuait, l'interaction âge \times charge cognitive n'était pas significative. Cela suggère qu'une partie substantielle de l'interaction âge \times rythme observée dans l'expérience précédente était due à des différences liées à la vitesse de lecture des chiffres. Cela signifie également que, comme nous l'avons noté plus haut, le développement du processus de réactivation ne va pas au-delà de l'augmentation générale de la vitesse de traitement liée à l'âge. Toutefois, les variations de la charge cognitive ont eu un effet proportionnel sur les performances des deux groupes. En effet, il est possible d'estimer pour chaque groupe d'âge et chaque condition de charge cognitive le temps disponible pour rafraîchir les traces mnésiques. Les analyses de régression linéaire reliant les empan à ce temps disponible ont révélé une fonction quasi-linéaire dans chaque groupe d'âge, avec une pente plus accentuée chez les jeunes enfants ([Fig. 4](#)). Alors qu'à 14 ans les enfants voient leurs performances de rappel augmenter d'environ 1 point pour chaque seconde supplémentaire de temps disponible après avoir lu un chiffre, cette augmentation n'était que de moitié chez les enfants de huit ans. Cette différence dans les pentes a confirmé que les enfants plus âgés étaient plus efficaces dans le rafraîchissement des traces en mémoire.

2.2.2. *Un changement critique entre cinq et sept ans*

Les deux expériences précédentes ont permis de préciser que le mécanisme de rafraîchissement est moins efficace chez les jeunes enfants puisque la pente de la fonction reliant les empan de mémoire de travail à la vitesse à laquelle la tâche secondaire était effectuée devient plus faible chez les enfants plus jeunes. Ce changement développemental suggère, comme l'avait proposé [Hitch \(2006\)](#), qu'il pourrait y avoir un âge où les enfants ne peuvent pas déplacer flexiblement leur attention du traitement au stockage au cours de la tâche secondaire. Ainsi, leur attention resterait en permanence occupée par les traitements de la tâche secondaire, sauf lorsque des éléments à mémoriser s'affichent à l'écran. Un tel fonctionnement correspondrait à l'hypothèse décrite par [Towse et Hitch \(1995 ; Towse et al., 1998\)](#) selon laquelle l'attention se déplace en fonction de la structure même de la tâche d'empan complexe, l'attention étant ainsi dirigée par les événements extérieurs. Dans ce cas, les traces en mémoire devraient souffrir d'un déclin continu au cours du traitement sans aucune tentative pour les rafraîchir. En conséquence, les performances de rappel ne seraient pas affectées par la charge cognitive de la tâche secondaire, mais seulement par sa durée. Cela ne veut pas dire que cette tâche secondaire n'aurait pas d'effet sur les rappels parce que l'exécution de la tâche secondaire capte l'attention. Les items à mémoriser quittent ainsi la mémoire primaire et souffrent d'un déclin temporel qui rend leur récupération plus difficile lors du rappel ([Unsworth et Engle, 2007](#)). En revanche, quand il n'y a pas de tâche secondaire, l'attention peut rester sur les items à mémoriser qui bénéficient d'une augmentation de leur niveau d'activation et sont donc plus faciles à récupérer. Ainsi, même si les jeunes enfants

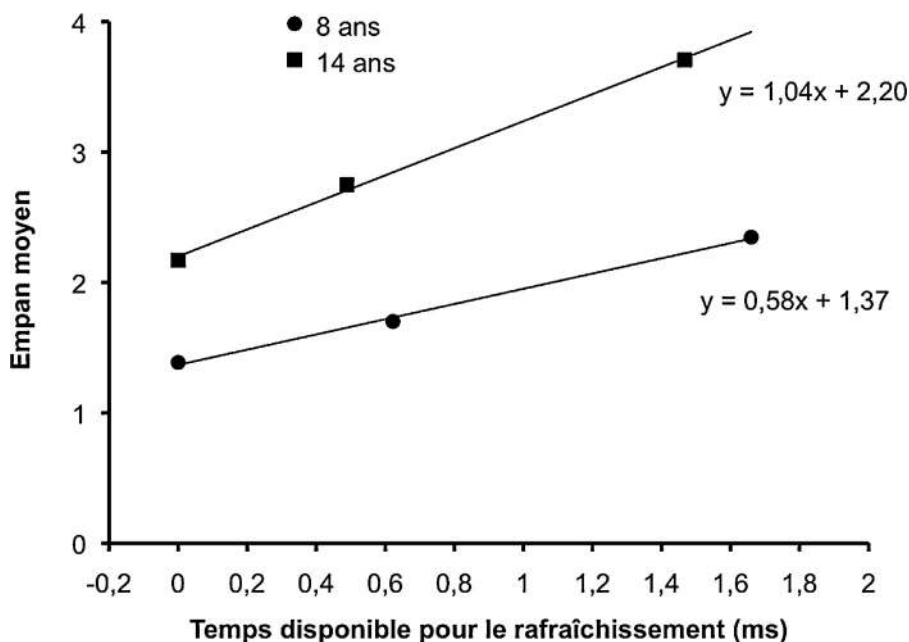


Fig. 4. Empan moyen en fonction du temps disponible pour rafraîchir les traces mnésiques dans la tâche d'empan de lecture de chiffres chez des enfants de huit et 14 ans (Barrouillet et al., 2009, Exp. 2).

ne sont pas affectés par des variations de la charge cognitive de la tâche secondaire parce qu'ils ne déplacent pas volontairement leur attention des traitements au stockage, leurs performances de rappel devraient néanmoins être plus faibles lorsqu'une tâche secondaire doit être exécutée qu'en l'absence de tâche concurrente.

Nous avons testé cette hypothèse sur deux groupes d'enfants de cinq et sept ans. Ces âges ont été choisis parce que de nombreuses études ont montré qu'avant l'âge de sept ans, les enfants n'ont pas spontanément recours à des stratégies de maintien (comme la répétition subvocale) dans les tâches de mémoire à court terme, (Gathercole & Hitch, 1993 ; Gathercole, Adams, & Hitch, 1994 ; Hitch, Halliday, Dodd, & Littler, 1989). Dans cette expérience, nous avons modifié notre paradigme de tâche d'empan complexe afin de l'adapter à des enfants si jeunes. Ils voyaient donc des dessins d'animaux dont ils devaient mémoriser les noms (l'expérimentateur nommait l'animal pour chaque dessin) tout en nommant la couleur de têtes de bonhommes (des « smileys ») successivement affichées à l'écran (Barrouillet et al., 2009, Exp. 3). La durée entre deux dessins d'animaux était maintenue constante alors que le nombre de couleurs dans chaque intervalle variait (0, deux, ou quatre couleurs). Comme les enfants devaient effectuer la tâche de dénomination de couleur, il était fort probable que les plus jeunes d'entre eux ne seraient pas tentés de maintenir activement les éléments en mémoire lors de l'exécution de cette tâche. Ainsi, chez les enfants plus jeunes, nous prédisions que la présence de la tâche de dénomination (par exemple, lorsque deux ou quatre couleurs étaient présentées) devait perturber les performances de rappel par rapport à la condition 0-couleur. Toutefois, nous nous attendions également à ce que les plus jeunes enfants ne tirant pas profit des pauses pour rafraîchir les traces en mémoire, les conditions deux- et quatre-couleurs qui avaient la même durée susciteraient des empan comparables. En revanche, si le mécanisme d'alternance attentionnelle décrit par le modèle TBRS est efficace dès l'âge de sept ans, les rappels chez les enfants plus âgés devraient dépendre de la charge cognitive de la tâche de dénomination de couleurs. Ainsi, la condition quatre-couleurs devrait susciter des empan plus faibles que la condition deux-couleurs.

Les résultats ont révélé qu'avant sept ans, le maintien d'éléments en mémoire de travail est affaibli par la présence d'une tâche secondaire, mais que la charge cognitive induite par cette tâche n'a pas

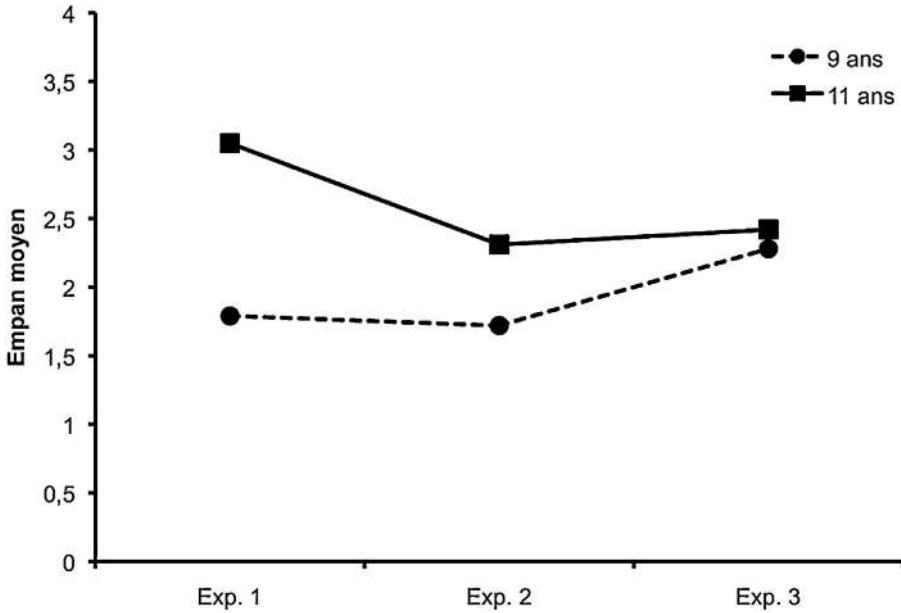


Fig. 5. Évolution de la différence d'empan entre des enfants de neuf et 11 ans au cours des trois expériences de Gaillard et al. (2011).

d'impact sur les performances de rappel. En effet, alors que les empan diminuaient progressivement avec le nombre de couleurs à dénommer chez les enfants de sept ans, les rappels à cinq ans demeuraient inchangés lorsque le nombre de couleurs passait de deux à quatre dans un même intervalle de temps. Cela suggère que, contrairement aux enfants plus âgés, les enfants de cinq ans n'ont pas tenté, ou n'étaient pas capables, de détourner leur attention de la tâche secondaire pour rafraîchir les traces en mémoire. Dès qu'une tête de bonhomme apparaissait, leur attention se dirigeait vers cette tâche de dénomination et les enfants attendaient les têtes successives sans aucune tentative de rafraîchissement jusqu'à ce que le dessin d'animal suivant soit affiché à l'écran. Ainsi, les résultats suggèrent que la manière dont les enfants de cinq ans s'acquittent de la tâche d'empan complexe reflète le fonctionnement décrit par Towse et al. (1998) qui proposaient que le principal déterminant de la mémoire de travail est la durée des épisodes de traitement plutôt que la charge cognitive induite par ce traitement. Enfin, il peut être également noté que l'absence de toute différence entre les conditions deux- et quatre-couleurs est en contradiction avec l'hypothèse d'un oubli par interférences représentationnelles. En effet, bien que plus d'informations soient traitées dans la condition quatre-couleurs, générant ainsi plus de représentations qui sont autant de source potentielles d'interférence, aucune différence n'apparaît dans les rappels par rapport à la condition avec deux couleurs.

En revanche, la performance des enfants de sept ans est en parfait accord avec ce que prédit le modèle TBRS, i.e. les rappels sont une fonction de la proportion de temps pendant laquelle le traitement occupe l'attention. Ainsi, la troisième expérience de Barrouillet et al. (2009) indique que la réactivation de traces mnésiques par le biais du processus de d'alternance attentionnelle rapide n'est pas un mécanisme universel présent à tout âge. Il semble apparaître entre cinq et sept ans. Comme les expériences 1 et 2 de Barrouillet et al. (2009) l'ont démontré, son efficacité et peut-être sa fréquence d'utilisation augmentent avec l'âge jusqu'à l'adolescence, produisant ainsi de grandes différences de développement dans la quantité d'information qui peut être maintenue active, en particulier lorsque des activités simultanées impliquent une charge cognitive modérée permettant de réactiver des éléments de mémoire. En conséquence, cette expérience constitue une évidence forte en faveur de l'hypothèse d'un développement du mécanisme d'alternance attentionnelle.

Une dernière expérience visait spécifiquement à tester la proposition faite par Hitch (2006) sur le changement développemental dans le contrôle ou l'utilisation du processus d'alternance. À un jeune âge, l'activité cognitive des enfants se calquerait sur la structure des tâches d'empan complexe, les enfants stockant et traitant l'information au moment où elle apparaît. Au contraire, après sept ans, les enfants seraient en mesure, au cours même des épisodes de traitement, de détourner leur attention vers les traces mnésiques stockées afin de les réactiver, comme le propose le modèle TBRS. Ainsi, les performances de rappel chez les enfants les plus jeunes devraient dépendre entièrement de la durée s'écoulant entre la présentation des informations et leur rappel, c'est-à-dire la durée de la composante de traitement dans les tâches d'empan complexe. D'autre part, la charge cognitive, c'est-à-dire la proportion de temps pendant laquelle l'attention est capturée, devrait être le facteur déterminant des rappels chez les enfants plus âgés. Dans une étude récente, nous avons modifié la tâche de dénomination de couleur décrite ci-dessus afin de manipuler orthogonalement la durée et la charge cognitive de la composante de traitement (Camos & Barrouillet, 2011b). Nous avons présenté une ou deux couleurs dans des intervalles de deux secondes, ou deux couleurs dans un intervalle de quatre secondes. D'une part, s'il n'y a pas de processus d'alternance attentionnelle chez les enfants les plus jeunes, la durée totale de la composante de traitement doit seule déterminer leurs performances de rappel. Ainsi, les deux premières conditions ayant la même durée de deux secondes ne devraient pas différer, mais elles devraient conduire à un meilleur rappel que la condition dont la durée est de quatre secondes. D'autre part, si les enfants peuvent flexiblement détourner leur attention pour réactiver les traces en mémoire, leurs empan devrait dépendre de la charge cognitive de la composante de traitement, et non de sa durée totale. La présentation de deux couleurs en deux secondes (soit une couleur par seconde) devrait induire une moindre performance de rappel que les deux autres conditions (une couleur en deux secondes et deux couleurs en quatre secondes, c'est-à-dire une couleur toutes les deux secondes) qui ne devraient pas différer entre elles. Les résultats montrent que les rappels des enfants de sept ans dépendent de la charge cognitive de la composante de traitement et non pas de sa durée. Toutefois, chez les enfants de cinq ans, la tendance inverse est observée : les performances de rappel diminuent lorsque la durée de l'activité de dénomination de couleur augmente, et ceci quelle que soit la charge cognitive. Ce changement dans la nature du facteur déterminant les rappels apporte un fort soutien à l'hypothèse selon laquelle un changement qualitatif intervient entre cinq et sept ans dans les processus chargés du maintien de l'information en mémoire de travail.

3. Conclusion

L'objectif des études présentées dans cet article était de faire la lumière sur les processus responsables de l'augmentation développementale de la capacité de la mémoire de travail. Il ne fait aucun doute que ce développement est le résultat de l'effet conjoint de plusieurs facteurs. Selon le modèle TBRS, la capacité de la mémoire de travail dépend principalement de trois facteurs. Le premier facteur concerne le changement développemental dans la vitesse de déclin mémoriel et il a été étudié, par exemple, par Cowan et al. (2000). Le but de cet article était donc de discuter de l'impact de deux autres facteurs. Le premier est la charge cognitive induite par la tâche secondaire effectuée durant le maintien, c'est-à-dire le temps pendant lequel l'attention est capturée par la composante de traitement des tâches d'empan complexe, ce qui détermine le temps pendant lequel les traces en mémoire souffrent d'un déclin temporel. Le second est l'efficacité du mécanisme d'alternance attentionnelle qui détermine la quantité d'information qui peut être réactivée dans une période de temps donnée. Par conséquent, si le temps de traitement et l'efficacité des mécanismes de maintien sont les principaux déterminants du développement de la mémoire de travail, la neutralisation de leurs variations à travers les âges devrait fortement réduire, sinon éliminer, les différences de développement dans les empan de mémoire de travail. C'est l'hypothèse qu'ont testé récemment Gaillard, Barrouillet, Jarrold, et Camos (2011).

Dans une série de trois expériences, Gaillard et al. (2011) ont utilisé une tâche d'empan complexe au cours de laquelle des enfants de neuf et 11 ans devaient maintenir des lettres tout en effectuant des additions simples sur des nombres à un chiffre apparaissant successivement à l'écran. Dans une première expérience, et afin d'établir la différence d'empan entre ces deux groupes d'âge, les enfants étaient soumis à la même tâche d'empan complexe impliquant les mêmes opérations.

Celles-ci consistaient à ajouter 1 aux chiffres présentés séquentiellement à l'écran. Cette mesure de référence révélait une différence importante entre les empan des enfants de neuf et 11 ans (en moyenne 1,79 et 3,05 respectivement ; Fig. 5). Le but de la seconde expérience était d'évaluer cette différence d'empan lorsque les durées de traitement étaient égalisées à travers les âges. Un pré-test a révélé que le temps mis par des enfants de 11 ans pour ajouter 2 à des chiffres était similaire à celui nécessaire aux enfants de neuf ans pour ajouter 1. Ainsi, en reprenant la tâche de l'expérience précédente mais en demandant aux enfants plus âgés d'ajouter 2 à chaque chiffre, la durée de traitement, et donc le temps pendant lequel les traces en mémoire déclinent, était égalisée entre les deux groupes d'âges. Cette modification a conduit à une forte réduction des différences de développement, l'empan moyen des enfants de 11 ans tombant à 2,31 au lieu de 3,05 dans l'expérience précédente (Fig. 5). Néanmoins, les enfants plus âgés surpassaient encore les plus jeunes. Ainsi, l'efficacité et la durée des traitements ne peuvent pas rendre compte seules de toutes les différences développementales de capacité de mémoire de travail. Le but de la dernière expérience était de tenter de réduire cette différence résiduelle de développement en adaptant à chaque groupe d'âge le temps disponible pour réactiver les traces mnésiques. Les auteurs ont supposé que la quantité d'information que le mécanisme de rafraîchissement peut réactiver est fonction de sa vitesse, un processus plus rapide permettant le maintien d'un nombre plus élevé d'éléments. Ainsi, pour compenser un processus de maintien potentiellement plus lent chez les jeunes enfants, il faut un temps disponible pour la réactivation plus long, en rapport avec la vitesse de traitement de ces enfants. Grâce aux données recueillies au cours du pré-test, les auteurs ont pu évaluer la différence de vitesse de traitement entre les enfants de neuf et 11 ans, et ainsi déterminer le temps libre nécessaire aux jeunes enfants pour atteindre un même niveau de rafraîchissement des traces que les enfants plus âgés. De nouveaux groupes d'enfants de neuf et 11 ans effectuaient donc la même tâche d'empan complexe que lors de l'expérience précédente, mais les enfants de neuf ans disposaient d'un peu plus de temps entre chaque addition. Cet accroissement de temps a conduit à une augmentation des performances de rappel des enfants de neuf ans, qui passaient à 2,28 d'empan, abolissant ainsi la différence résiduelle qui persistait à l'issue de l'expérience précédente (Fig. 5). En résumé, la grande différence d'empan observée entre les enfants de neuf et 11 ans qui accomplissent la même tâche d'empan complexe est réduite lorsque l'efficacité du traitement est égalisée à travers les âges, et disparaît lorsque le temps disponible pour réactiver les traces mnésiques est adapté à la vitesse de traitement des enfants, c'est-à-dire lorsque les jeunes enfants bénéficient de temps de réactivation plus longs (Fig. 5).

Comme nous l'avons rappelé plus haut, [Case \(1985 ; Case et al., 1982\)](#) a suggéré dans sa théorie que l'augmentation avec l'âge de l'efficacité du traitement est l'un des principaux facteurs de développement de la mémoire de travail. En supposant qu'un espace total de traitement fixe et limité est partagé entre les traitements et le stockage à court terme, toute réduction de l'espace alloué aux traitements résulte en l'augmentation corrélative de l'espace disponible pour le stockage. Parce que des processus plus efficaces demandent moins de ressources, l'augmentation liée à l'âge de l'efficacité du traitement devrait se traduire par un espace de stockage à court terme plus important et une augmentation des empan (voir aussi [Kail & Ferrer, 2007](#), pour une conception semblable). En conséquence, [Case et al. \(1982\)](#) ont observé que lorsque l'efficacité du traitement d'adultes et d'enfants de six ans est égalisée, ces deux groupes obtiennent des performances de rappel similaires. Toutefois, l'étude de [Gaillard et al. \(2011 ; Exp. 2\)](#) montre que même lorsque l'efficacité du traitement est maintenue constante entre les âges, des différences développementales persistent dans les empan de mémoire de travail. Ainsi, contrairement à l'hypothèse de Case, la capacité de la mémoire de travail ne dépend pas uniquement de l'efficacité des traitements.

Au lieu de cela, le modèle TBRS suppose que les empan de mémoire de travail dépendent également de l'efficacité des processus de réactivation qui ont lieu durant les périodes de temps libre. Même lorsque ce temps libre est maintenu constant, comme dans l'expérience 2 de [Gaillard et al. \(2011\)](#), les enfants plus âgés tirent davantage profit de ces périodes probablement grâce à une réactivation plus efficace des traces mnésiques. Ce résultat fait écho à [Cowan, Morey, AuBuchon, Zwilling, et Gilchrist \(2010\)](#) qui ont conclu que les différences d'âge existent dans le traitement, mais aussi dans les fonctions de stockage. Le fait que, dans l'expérience 3 de [Gaillard et al. \(2011\)](#), l'adaptation des temps libres à la vitesse de traitement propre à chaque âge ait conduit les jeunes enfants à un niveau de rappel comparable à celui de leurs pairs plus âgés suggère que le stockage est un processus actif

par lequel les traces mnésiques sont en permanence réactivées par le biais d'un mécanisme temporellement contraint dont l'efficacité dépend de la vitesse. La supériorité des enfants plus âgés dans l'expérience 2 disparaît lorsqu'on donne aux jeunes enfants le temps d'atteindre un niveau identique de réactivation. Cela suggère donc que les enfants plus âgés sont plus rapides que les plus jeunes dans la réactivation des traces mnésiques.

En d'autres termes, il semble qu'il y ait un lien étroit entre la vitesse de traitement et la capacité de mémoire de travail qui va plus loin que la relation envisagée par [Towse et Hitch \(1995\)](#) qui pensaient que les enfants plus âgés surpassaient les plus jeunes parce qu'ils étaient plus rapides dans l'exécution de la tâche concurrente et bénéficiaient ainsi de délais de maintien plus courts. Bien sûr, une vitesse de traitement plus élevée permet d'abrèger les périodes durant lesquelles les traces en mémoire s'effacent, mais elle permet également une réactivation plus efficace de ces traces lorsque l'attention est de nouveau disponible suite à un épisode de traitement. Le lien potentiel entre l'efficacité des traitements et celle de la réactivation des traces mnésiques suggéré par l'étude de [Gaillard et al. \(2011\)](#) est conforme à l'un des principaux fondements du modèle TBRS, qui suppose que les deux fonctions de la mémoire de travail que sont le traitement et le stockage requièrent l'implication de fonctions exécutives qui sont, dans le modèle de Baddeley, considérées sous le contrôle de l'administrateur central ([Barrouillet, Portrat, & Camos, 2011](#)). Parce que les principales contraintes du système cognitif sont la séquentialité des fonctions exécutives et le caractère éphémère des représentations, la vitesse de traitement est l'une des principales variables psychologiques qui médiate la relation entre les ressources cognitives et le fonctionnement de la mémoire de travail.

Pour conclure, les différences liées à l'âge dans l'efficacité du traitement, mais aussi dans l'efficacité du mécanisme de maintien des traces mnésiques rendent compte du développement de la capacité de la mémoire de travail. Il est à noter que ces deux facteurs ne sont probablement pas les seules contraintes pesant sur le développement de la mémoire de travail. D'autres facteurs importants pourraient être liés à l'âge comme l'efficacité des stratégies pour composer avec les exigences des tâches complexes ([McNamara & Scott, 2001](#)). Cependant, les mécanismes liés à la vitesse décrits dans cet article semblent avoir un rôle bien supérieur à celui de ces autres facteurs, puisque l'augmentation de la vitesse permet aux enfants plus âgés d'éviter la perte d'informations stockées à court terme, à la fois par la réduction du temps consacré à des activités concurrentes au cours duquel se produit l'oubli, et par l'amélioration de l'efficacité des mécanismes consacrés à la réactivation des traces mnésiques.

Déclaration d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de conflits d'intérêts en relation avec cet article.

Références

- Anderson, J. R. (1993). *Rules of the mind*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Anderson, J. R., & Lebiere, C. (1998). *Atomic components of thought*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. Oxford: Clarendon Press.
- Baddeley, A. D. (2012). Working memory: theories, models, and controversis. *Annual Review of Psychology*, 63, 1–29.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. In G. A. Bower (Ed.), *Recent advances in learning and motivation* (pp. 647–667). New York: Academic Press.
- Baddeley, A. D., & Logie, R. H. (1999). Working memory: The multiple-component model. In A. Miyake, & P. Shah (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 28–61). Cambridge: Cambridge University Press.
- 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. (2007b). The time-based resource sharing model of working memory. In N. Osaka, R. Logie, & M. D'Esposito (Eds.), *The cognitive neuroscience of working memory* (pp. 59–80). Oxford: Oxford University Press.
- 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 function: the TBRS approach. *Psychological Belgica*, 50(3&4), 353–382.
- Barrouillet, P., Camos, V., Morlaix, S., & Suchaut, B. (2008). Compétences scolaires, capacités cognitives et origine sociale : quels liens à l'école élémentaire ? *Revue Française de Pédagogie*, 162, 5–14.
- Barrouillet, P., De Paepe, A., & Langerock, N. (2012). Time causes forgetting from working memory. *Psychonomic Bulletin and Review*, 19, 87–92.
- 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., Lépine, R., & Camos, V. (2008). Is the influence of working memory capacity on high level cognition mediated by complexity or resource-dependent elementary processes? *Psychonomic Bulletin & Review*, 15(3), 528–534.
- Barrouillet, P., Portrat, S., & Camos, V. (2011). On the law relating processing to storage in working memory. *Psychological Review*, 118(2), 175–192.
- Barrouillet, P., Portrat, S., Vergauwe, E., Diependaele, K., & Camos, V. (2011). Further evidence for temporal decay in working memory: reply to Lewandowsky and Oberauer (2009). *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 37(5), 1302–1317.
- Bayliss, D. M., Jarrold, C., Baddeley, A. D., Gunn, D. M., & Leigh, E. (2005). Mapping the developmental constraints on working memory span performance. *Developmental Psychology*, 41(4), 579–597.
- Camos, V., & Barrouillet, P. (2011a). Factors of working memory development: The time-based resource-sharing approach. In P. Barrouillet, & V. Gaillard (Eds.), *Cognitive development and working memory: From neo-piagetian to cognitive approaches* (pp. 151–176). Hove, UK: Psychology Press.
- Camos, V., & Barrouillet, P. (2011b). Developmental change in working memory strategies: from passive maintenance to active refreshing. *Developmental Psychology*, 47, 898–904.
- Camos, V., Lagner, P., & Barrouillet, P. (2009). Two maintenance mechanisms of verbal information in working memory. *Journal of Memory and Language*, 61, 457–469.
- 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.
- Case, R. (1985). *Intellectual development: Birth to adulthood*. New York: Academic Press.
- Case, R., Kurland, M., & Goldberg, J. (1982). Operational efficiency and the growth of short-term memory. *Journal of Experimental Child Psychology*, 33, 386–404.
- Corbin, L., Moissenet, A., Camos, & V. (2012). Le fonctionnement de la mémoire de travail chez des enfants présentant des difficultés scolaires. *Développements*, 11, 5–12.
- Conway, A. R. A., Kane, M. J., & Engle, R. W. (2003). Working memory capacity and its relation to general intelligence. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(12), 547–552.
- Cowan, N. (1992). Verbal memory span and the timing of spoken recall. *Journal of Memory and Language*, 31, 668–684.
- Cowan, N. (1995). *Attention and memory: An integrated framework*. New York: Oxford University Press.
- Cowan, N. (1999). An embedded-process model of working memory. In A. Miyake, & P. Shah (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 62–101). Cambridge: Cambridge University Press.
- Cowan, N. (2005). *Working memory capacity*. Hove: Psychology Press.
- Cowan, N., Morey, C. C., AuBuchon, A. M., Zwilling, C. E., & Gilchrist, A. L. (2010). Seven year-olds allocate attention like adults unless working memory is overloaded. *Developmental Science*, 13(1), 120–133.
- Cowan, N., Nugent, L. D., Elliot, E. M., & Saults, J. S. (2000). Persistence of memory for ignored lists of digits: areas of developmental consistency and change. *Journal of Experimental Child Psychology*, 76, 151–172.
- Daneman, M., & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 19, 450–466.
- Engle, R. W., & Kane, M. J. (2004). Executive attention, working memory capacity, and a two-factor theory of cognitive control. In B. Ross (Ed.), *The Psychology of Learning and Motivation* (pp. 145–199). NY: Elsevier.
- Engle, R. W., Kane, M. J., & Tuholski, S. W. (1999). Individual differences in working memory capacity and what they tell us about controlled attention, general fluid intelligence, and functions of the prefrontal cortex. In A. Miyake, & P. Shah (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 102–134). Cambridge: Cambridge University Press.
- 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.
- Garavan, H. (1998). Serial attention within working memory. *Memory and Cognition*, 26(2), 263–276.
- Gathercole, S. E., & Hitch, G. J. (1993). Developmental changes in short-term memory: A revised working memory perspective. In A. Collins, S. E. Gathercole, M. A. Conway, & P. E. Morris (Eds.), *Theories of memory* (pp. 189–210). Hove, England: Erlbaum.
- Gathercole, S. E., Adams, A. M., & Hitch, G. J. (1994). Do young children rehearse? An individual-differences analysis. *Memory and Cognition*, 22, 201–207.
- Gavens, N., & Barrouillet, P. (2004). Delays of retention, processing efficiency, and attentional resources in working memory span development. *Journal of Memory and Language*, 51, 644–657.
- Gavens, N., & Camos, V. (2006). La mémoire de travail : une place centrale dans les apprentissages scolaires fondamentaux. In E. Gentaz, & P. Dessus (Eds.), *Apprentissages et enseignement : Sciences cognitives et éducation* (pp. 91–106). Paris: Dunod.
- Gavens, N., & Camos, V. (2007). Mémoire de travail et développement. In *Entretiens d'Orthophonie de Bichat – 2007*. Paris: Expansion Formation et Editions. Leverhulme Trust., pp. 7–19.
- Halford, G. S. (1993). *Children's understanding*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Halford, G. S., Wilson, W. H., & Phillips, S. (1998). Processing capacity defined by relational complexity: implications for comparative, developmental, and cognitive psychology. *Behavioral and Brain Sciences*, 21, 803–864.
- Hitch, G. (2006). Working memory in children: A cognitive approach. In E. Bialystok, & F. I. Craik (Eds.), *Lifespan cognition: Mechanisms of change* (pp. 112–127). New York, NY: Oxford University Press.
- Hitch, G., 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(4), 347–362.

- Hitch, G., Towse, J. N., & Hutton, U. (2001). What limits children's working memory span? Theoretical accounts and applications for scholastic development. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130(2), 184–198.
- Johnson, M. K. (1992). MEM: mechanisms of recollection. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 4, 268–280.
- Kail, R. V. (2001). Development of processing speed in childhood and adolescence. In H. Reese (Ed.), *Advances in child development and behavior* (pp. 151–185). San Diego: Academic Press.
- Kail, R. V., & Ferrer, E. (2007). Processing speed in childhood and adolescence: longitudinal models for examining developmental change. *Child Development*, 78(6), 1760–1770.
- Kane, M. J., & Engle, R. W. (2003). Working memory capacity and the control of attention: the contributions of goal neglect, response competition, and task set to Stroop interference. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132, 47–70.
- Kyllonen, P. C., & Christal, R. E. (1990). Reasoning ability is (little more than) working-memory capacity? *Intelligence*, 33, 1–64.
- Lépine, R., Barrouillet, P., & Camos, V. (2005). What makes working memory span so predictive of high level cognition? *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(1), 165–170.
- Lépine, R., Bernardin, S., & Barrouillet, P. (2005). Attention switchings and working memory spans. *European Journal of Cognitive Psychology*, 17, 329–346.
- Liefooghe, B., Barrouillet, P., Vandierendonck, A., & Camos, V. (2008). Working memory costs of task switching. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 34(3), 478–494.
- Logan, G. D. (1988). Toward an instance theory of automatization. *Psychological Review*, 95, 492–527.
- McNamara, D. C., & Scott, J. L. (2001). Working memory capacity and strategy use. *Memory & Cognition*, 29, 10–17.
- Oberauer, K. (2002). Access to information in working memory: exploring the focus of attention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 28, 411–421.
- Oberauer, K. (2005). Control of the contents of working memory – a comparison of two paradigms and two age groups. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 31, 714–728.
- Pascual-Leone, J. A. (1970). A mathematical model for the transition rule in Piaget's developmental stage. *Acta Psychologica*, 32, 301–345.
- Pashler, H. (1998). *The psychology of attention*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Portrat, S., Barrouillet, P., & Camos, V. (2008). Time-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-related functioning similar to adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, 102, 368–374.
- Raye, C. L., Johnson, M. K., Mitchell, K. J., Greene, E. J., & Johnson, M. R. (2007). Refreshing: a minimal executive function. *Cortex*, 43, 135–145.
- 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, 447–453.
- Swanson, H. L. (1996). Individual and age-related differences in children's working memory. *Memory and Cognition*, 24, 70–82.
- Towse, J. N., Hitch, G. J., & Hutton, N. (2007). Working memory as the interface between processing and retention: a developmental perspective. *Advances in Child Development and Behavior*, 35, 219–251.
- Towse, J. N., Hitch, G. J., & Hutton, U. (2002). On the nature of the relationship between processing activity and item retention in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 82, 156–184.
- Towse, J. N., & Hitch, G. J. (1995). Is there a relationship between task demand and storage space in tests of working memory capacity? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 48A, 108–124.
- Towse, J. N., & Houston-Price, C. M. T. (2001). Reflections on the concept of central executive. In J. Andrade (Ed.), *Working memory in perspective* (pp. 240–260). Philadelphia, PA: Psychology Press.
- Towse, J. N., Hitch, G. J., & Hutton, U. (1998). A reevaluation of working memory capacity in children. *Journal of Memory and Language*, 39, 195–217.
- Towse, J. N., Hitch, G. J., & Hutton, U. (2000). On the interpretation of working memory spans in adults. *Memory and Cognition*, 28, 341–348.
- Turner, M. L., & Engle, R. W. (1989). Is working memory task dependent? *Journal of Memory and Language*, 28, 127–154.
- Unsworth, N., & Engle, R. W. (2007). The nature of individual differences in working memory capacity: active maintenance in primary memory and controlled search from secondary memory. *Psychological Review*, 114(1), 104–132.
- Vergauwe, E., Barrouillet, P., & Camos, V. (2009). Visual and spatial working memory are not that dissociated after all: a time-based resource-sharing account. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 35(4), 1012–1028.
- Vergauwe, E., Barrouillet, P., & Camos, V. (2010). Verbal and visuo-spatial working memory: a case for domain-general time-based resource sharing. *Psychological Science*, 21(3), 384–390.