

Prendre en compte la mémoire de travail lors de la conception de situations d'apprentissage scolaire

S. Puma* et A. Tricot**

*INSPE de Versailles et Laboratoire Paragraphe (EA 349)

CY : Cergy Paris Université

26 avenue Léon Jouhaux, 92160 Antony

sebastien.puma@cyu.fr

** Université Paul Valéry Montpellier 3 et Laboratoire Epsilon

Prendre en compte la mémoire de travail lors de la conception de situations d'apprentissage scolaire

Résumé. Depuis 40 ans, plusieurs milliers de recherches sont consacrées à l'amélioration de la compatibilité entre les situations d'apprentissage scolaire et les contraintes exercées par la mémoire de travail. L'objectif de cet article est de présenter quelques-uns de ces travaux. Nous montrons que quatre modèles successifs de la mémoire de travail ont largement contribué à l'élaboration de deux théories en ingénierie pédagogique, mais aussi de dix-sept principes de conception de tâches et de supports pour ces apprentissages.

Mots clés : apprentissages scolaires, mémoire de travail, ingénierie pédagogique

Abstract. For 40 years, several thousand published papers have been devoted to the improvement of the compatibility between school learning and working memory constraints. Our aim is to present some of this work. We show that four successive working memory models have contributed to the development of two instructional design theories, but also to seventeen instructional design principles.

Keywords: academic learning, working memory, instructional design

Resumen. Desde hace 40 años, varios miles de trabajos publicados se dedican a mejorar la compatibilidad entre el aprendizaje escolar y las limitaciones impuestas por la memoria de trabajo. Nuestro objetivo es presentar algunos de estos trabajos. Mostramos que cuatro modelos sucesivos de memoria de trabajo han contribuido al desarrollo de las teorías de la ingeniería educativa, pero también a diecisiete principios de ingeniería educativa.

Palabras clave: aprendizaje académico, memoria de trabajo, ingeniería pedagógica

Prendre en compte la mémoire de travail lors de la conception de situations d'apprentissage scolaire

Introduction

Quand un.e élève apprend à l'école, c'est notamment son système cognitif qui apprend. Ce dernier a plusieurs composants, dont la mémoire de travail (MdT). Depuis une quarantaine d'années, de nombreux travaux tentent de prendre en compte les caractéristiques de la MdT pour améliorer les apprentissages scolaires. Au lieu d'essayer d'augmenter la capacité de la MdT des élèves par des entraînements, ou de stimuler la mise en œuvre de telle ou telle fonction exécutive, les approches que nous présentons ici agissent sur les situations d'apprentissage elles-mêmes. Elles essaient d'améliorer la compatibilité cognitive entre les situations d'apprentissage scolaire et les contraintes exercées par la MdT. L'objectif de cet article est de présenter quelques-uns de ces travaux pour illustrer le fait que l'amélioration de notre connaissance de la MdT a permis d'améliorer la conception de situations d'enseignement. Ces travaux ont mis à jour dix-sept « principes de conception » (voir le tableau 1) que les enseignants peuvent utiliser lorsqu'ils conçoivent les tâches et les supports que vont utiliser leurs élèves. Ces principes ne concernent pas d'autres aspects des situations d'apprentissage scolaire comme la caractérisation du savoir à apprendre, la régulation et l'évaluation de l'apprentissage, la motivation et la métacognition des élèves, etc.

Si les premiers travaux sur ce que l'on appelle aujourd'hui la MdT datent du 19^{ème} siècle (Jevons, 1871 ; James, 1890), on doit à Broadbent (1958) l'idée d'une architecture de notre système cognitif qui organise le traitement d'une information avec (a) un magasin de type sensoriel qui contient beaucoup d'informations, brièvement ; (b) un filtre attentionnel ; (c) une MdT qui ne contient que quelques éléments et (d) une mémoire à long terme (MLT) qui est notre réservoir de connaissances accumulées tout au long de notre vie. Cette architecture servira de base au modèle proposé dix ans plus tard par Atkinson et Schiffrin (1968). Dans le domaine des apprentissages, cette architecture permet de considérer que nous sommes capables d'apprendre beaucoup de connaissances et tout au long de notre vie, mais que cet apprentissage est contraint par les traitements sensoriels, attentionnels et ceux réalisés au sein de la MdT. Dans cet article nous allons donc nous focaliser sur les contraintes exercées par la MdT, en commençant par cette idée simple d'une MdT qui ne contient que quelques éléments. Si l'objectif du présent article n'est pas de présenter les dix-sept principes évoqués précédemment, neuf d'entre eux seront décrits et mis en regard avec les différents modèles de la mémoire de travail.

Nous aborderons ensuite un second modèle de la MdT, celui de Baddeley (1986), où la MdT fonctionne avec un administrateur central, qui traite activement les informations, et avec deux systèmes de traitement esclaves : le calepin visuo-spatial et la boucle phonologique, qui ne peuvent que stocker temporairement de l'information et l'envoyer vers l'administrateur central. Nous verrons comment ce modèle a permis produire des hypothèses extrêmement fructueuses dans le domaine des apprentissages multimédias, c'est-à-dire toutes ces situations dans lesquelles les élèves entendent ou lisent des mots et regardent des images.

Dans une troisième partie, nous aborderons le modèle de la MdT à long terme d'Ericsson et Kintsch (1995). Ces auteurs ont repris l'idée selon laquelle la MdT est la partie activée de la

MLT (Cowan, 1988). Une simple opération de récupération, utilisant des indices de la partie à court terme, peut rendre disponible la partie activée de la MLT, libérant autant de ressources. Nous verrons que cette approche a permis de comprendre un des résultats les plus importants en psychologie de l'éducation : ce qui améliore l'apprentissage des élèves novices (avec peu de connaissances en MLT), peut détériorer l'apprentissage des élèves experts (les plus avancés).

Enfin, dans une quatrième partie, nous traiterons du modèle de partage temporel des ressources, de Barrouillet et Camos (2015). Selon ce modèle, la MdT utilise une seule ressource : l'attention. Les items en MdT ont un niveau d'activation qui diminue au cours du temps et le maintien de ces items correspond à l'activité de rafraîchissement. La réalisation d'une tâche complexe entraîne une alternance rapide du focus attentionnel entre le traitement et le rafraîchissement. Plus la pression temporelle sur cette répartition du focus attentionnel est forte, plus la charge en MdT augmente. Ce modèle a permis de reconsidérer le rôle crucial de la répartition du temps dans les apprentissages scolaires. Il a notamment donné une explication à des résultats difficiles à comprendre à propos des pauses et des flux d'information continue (vidéos, fichiers sons).

Les effets d'une mémoire de travail à capacité limitée

La théorie de la charge cognitive (Sweller, 1988) est la première à avoir considéré que la conception de situations d'apprentissage scolaire devait se fonder sur les contraintes exercées par la MdT. Les ressources limitées en MdT sont mobilisées dans la majorité des apprentissages scolaires (ce qui est d'ailleurs très différent dans le cas des apprentissages implicites) et doivent conséquemment être ménagées. Il est donc nécessaire de décrire et comprendre ces ressources, leur mobilisation et les contraintes qui pèsent sur elles, afin de présenter le support et la tâche d'apprentissage les plus adaptés possible. La théorie de la charge cognitive vise donc à décrire des manières de présenter les informations pour optimiser la sollicitation de la MdT et ainsi favoriser les apprentissages.

Un des postulats de la théorie de la charge cognitive est que les connaissances résultant des apprentissages sont stockées en MLT sous la forme de schémas (Bartlett, 1932). Apprendre, c'est élaborer, consolider, un schéma en MLT. Cependant, toutes les informations constitutives d'un schéma donné doivent d'abord passer par la MdT. Tous ces éléments et leurs relations entre eux prennent une place en MdT et peuvent la surcharger.

La théorie de la charge cognitive décrit l'investissement des ressources cognitives en MdT lors des apprentissages en les divisant en trois catégories : les charges cognitives intrinsèque, extrinsèque et utile (Sweller, van Merriënboer & Paas, 2019).

La charge cognitive intrinsèque désigne les informations et traitements pertinents et nécessaires à l'apprentissage. Cette charge est inévitable et nécessaire. C'est à l'enseignant de s'assurer que les ressources disponibles de l'élève lui permettent de réaliser l'apprentissage et les différentes activités utilisées pour consolider la connaissance en cours d'élaboration. Ce sont les connaissances spécifiques en MLT qui sont la source et le résultat des apprentissages scolaires (Tricot & Sweller, 2014).

La charge cognitive extrinsèque désigne les ressources et traitements cognitifs investis sur des activités qui ne sont pas directement nécessaires à l'apprentissage. Ce sont généralement des éléments résultant d'une conception non optimale du support d'apprentissage. C'est par exemple présenter un problème géométrique de façon verbale et alambiquée, sans donner la figure.

Enfin, la charge utile (*germane load*) désigne la part des ressources cognitives qui ne sont pas utilisées pour réaliser la tâche d'apprentissage mais pour transférer les informations maintenues en MdT vers la MLT. Ce troisième type de charge permet d'expliquer qu'un.e élève puisse résoudre un problème mais n'en rien apprendre. Si trop peu des ressources cognitives sont disponibles pour transposer les informations de la MdT en MLT, l'apprentissage est moindre.

Selon la théorie de la charge cognitive, les trois types de charges se cumulent. Si les charges intrinsèques et extrinsèques consomment trop de ressources, il n'en restera plus à consacrer à la charge utile. Si cette somme est en deçà des ressources disponibles, alors le restant peut être consacré à la charge utile, et donc à apprendre. La charge cognitive est aussi un phénomène qui varie au cours du temps. Elle doit donc être ménagée tout au long de la réalisation de l'activité.

Nous allons maintenant présenter un principe de conception de situations d'apprentissage obtenu dans le cadre de la théorie de la charge cognitive avec un simple modèle de la MdT à capacité limitée.

Le principe d'étude du problème résolu (2^{ème} principe dans le tableau)

Un des premiers résultats empiriques de la théorie de la charge cognitive est qu'en réduisant au maximum la charge intrinsèque on améliore l'apprentissage ; par exemple en demandant aux élèves d'étudier sur un problème déjà résolu plutôt que de résoudre ce problème (Sweller & Cooper, 1985). En effet, lorsque l'on demande aux élèves de résoudre un problème pour apprendre une notion de mathématiques, ces derniers apprennent moins bien que ceux auxquels on demande de travailler les mêmes problèmes accompagnés de leurs solutions. Du point de vue de l'apprentissage, les deux situations sont équivalentes. Du point de vue la tâche à réaliser, étudier un problème résolu est moins exigeant. Ce principe a fait l'objet de plusieurs centaines d'études empiriques et de nombreuses synthèses. La méta-analyse de Crissman (2006) montre une taille d'effet moyenne ($d = 0,57$) quand l'étude de problèmes résolus est comparée à la résolution de problème. Les problèmes résolus ne sont efficaces que pour les élèves novices. Cependant, cette vision simpliste de la MdT a vite été remplacée pour un modèle plus élaboré, avec un grand succès dans le domaine de la conception de supports d'apprentissage.

Les effets d'une mémoire de travail en composantes multiples

Le modèle en composantes multiples de Baddeley (1986) marque un apport théorique considérable. La MdT n'est plus un registre de stockage passif imposant un goulet d'étranglement à la quantité d'informations pouvant être apprises simultanément, c'est un espace de transformation des informations. Cela permet de réconcilier les résultats précédents

de la théorie de la charge cognitive, portant sur la capacité limitée de traitement de l'information, et des résultats émergents, selon lesquels utiliser plusieurs modalités pourrait donner de meilleures performances d'apprentissage. Les informations sont ici considérées sous la forme de *chunks* (Miller, 1956) stockés et manipulés dans chacun des deux modules esclaves (la boucle phonologique et le calepin visuo-spatial) en fonction de leur modalité. C'est l'administrateur central qui répartit l'attention entre les deux modules pour élaborer une représentation incluant des informations de chacun des deux. Lorsque ces informations sont congruentes, comme dans le cas d'une présentation d'un schéma commenté à l'oral, elles peuvent être intégrées dans une même représentation. À l'inverse, si l'administrateur central doit les traiter isolément l'apprentissage est moins bon qu'en traitant une seule. En lien direct avec le modèle de Baddeley, la théorie cognitive de l'apprentissage multimédia (Mayer, 2021) est fondée sur trois grandes hypothèses :

1. Deux canaux de traitement : les humains disposent de deux canaux pour traiter séparément le matériel visuel (images fixes ou animées, mots écrits) et audio (discours oraux, sons). L'élève sélectionnera les mots pertinents à traiter avec la boucle phonologique et les images pertinentes à traiter avec le calepin visuo-spatial.
2. Une capacité limitée : il y a une limite à la quantité d'informations que les humains peuvent traiter simultanément. Cette seconde hypothèse prend sa source dans l'article de Miller (1956) et correspond explicitement au fonctionnement et aux contraintes de l'administrateur central du modèle de Baddeley.
3. Le traitement actif : les humains sont capables de sélectionner les informations qu'ils traitent dans leur environnement (c'est le rôle de l'attention). Ils sont capables d'organiser ces informations de façon signifiante pour eux (c'est le *chunking* que nous avons évoqué ci-dessus et qui peut correspondre à des activités comme la comparaison, la généralisation, l'énumération, la classification, le calcul). Enfin, ils peuvent intégrer ces informations à leurs connaissances préalables en mémoire à long terme.

Plusieurs milliers de travaux empiriques publiés dans le cadre de cette théorie ont mis à jour des « principes de conception » (ces principes étant souvent communs avec ceux de la théorie de la charge cognitive). Nous en présentons quelques un ici (voir la synthèse récente coordonnée par Mayer, 2021).

Le principe multimédia (4^{ème} principe dans le tableau)

Avec un document contenant du texte et de l'image, l'élève apprend généralement mieux qu'avec du texte seul ou de l'image seule. L'image et le texte doivent être complémentaires et pertinents. Les images permettent un meilleur souvenir de l'information que le texte seul. Les images ont une fonction plus concrète dans la représentation mentale de l'élève et lui permettent un meilleur rappel et un meilleur transfert des connaissances. Une méta-analyse récente confirme l'effet du principe multimédia sur les apprentissages (Guo, Zhang, Wright, & McTigue, 2020), avec un effet modéré ($g = 0,39$). Il est cependant difficile dans le domaine des apprentissages de comparer deux supports différents (un texte illustré vs. un texte sans illustration) en considérant qu'ils sont... comparables. Ajouter une image à un texte c'est modifier deux variables en même : le média et la quantité d'information.

Le principe de contiguïté (5^{ème} principe dans le tableau)

Quand deux sources d'information doivent être présentées à un.e élève, l'attention de l'élève est partagée entre ces deux sources, ce qui génère des difficultés. Une façon de limiter ces difficultés est d'intégrer les deux sources, dans l'espace et dans le temps. Les humains ne peuvent pas faire attention à plusieurs choses à la fois pour deux raisons : perceptives, ils ne peuvent pas regarder dans deux directions à la fois, et attentionnelles. Quand deux sources sont présentées à deux endroits différents d'une page (ou à deux moments différents, ou sur deux supports différents), le regard de l'élève va de l'un à l'autre. Ces allers-retours sont coûteux et peuvent générer des erreurs de référencements. Par exemple, elle / il attribue tel passage de texte à tel aspect du schéma, de façon non pertinente. La méta-analyse de Ginns (2005) confirme le principe de contiguïté et montre un effet important ($d = 0,85$), confirmé ensuite par Schroeder et Cenkci (2018) qui se sont focalisés sur la contiguïté spatiale ($g = 0,63$). La solution qui consiste à simplement signaler les relations (par des flèches par exemple) est moins efficace ($r = 0,17$) selon la méta-analyse de Richter, Scheiter et Eitel (2016).

Le principe de modalité (6^{ème} principe dans le tableau)

Quand le contenu à traiter par un.e élève est exigeant, il est plus efficace (sous certaines conditions) d'utiliser les modalités visuelle et auditive plutôt qu'une seule. Si le contenu à traiter par un.e élève est exigeant, la limite de ses capacités attentionnelles pèse comme une contrainte : ne pouvant pas tout traiter à la fois, l'élève ne traite qu'une partie de l'information. Le fait de présenter l'information selon deux modalités (une partie du contenu est présentée de façon visuelle, une autre partie de façon auditive) mobilise deux systèmes différents de traitement de l'information et diminue le risque d'attention partagée. La méta-analyse de Ginns (2005) confirme le principe de modalité et montre un effet important ($d = 0,72$).

Le principe d'animation (16^{ème} principe dans le tableau)

L'animation, sous forme de vidéo ou de simulation par exemple, est utilisée pour représenter des phénomènes dynamiques que les élèves doivent comprendre ou pour représenter des gestes ou mouvements que les élèves doivent apprendre à faire. L'idée est que dans ces deux cas, l'animation doit entraîner une plus-value par rapport à une représentation statique. La méta-analyse de Höffler et Leutner (2007) montre que le principe d'animation correspond à une taille d'effet modérée ($d = 0,37$). Les analyses indiquent des tailles d'effet plus importantes lorsque l'animation est pertinente plutôt que décorative ($d = 0,40$), lorsque l'animation est très réaliste, par exemple sur vidéo ($d = 0,76$) et / ou lorsque la connaissance à apprendre est procédurale ou motrice ($d = 1,06$). La méta-analyse de Berney et Bétrancourt (2016) montre encore un effet général faible ($g = 0,23$).

Le principe de redondance (7^{ème} principe dans le tableau)

Ce principe a été initialement obtenu en étudiant le principe de modalité. Si les apprentissages sont favorisés par la présentation de l'information dans les deux modalités sensorielles et donc dans les deux sous-modules de la MdT, certaines présentations peuvent avoir un effet négatif. En effet, si l'information maintenue dans les deux sous-modules est rigoureusement identique

(exemple typique d'un texte dit à l'oral alors qu'il est affiché sur une diapositive), on obtient un effet de redondance. Cela s'explique par le fait que toutes les informations maintenues et traitées en MdT imposent un coût cognitif, attentionnel lors de la sélection, puis une place en MdT et enfin un coût de traitement par l'administrateur central. Ainsi, présenter deux fois la même information, dans deux modalités différentes double le coût de traitement de cette information. Par contre, la connaissance élaborée en mémoire à long terme sur la base de cette information ne sera pas plus complète, puisqu'elle reste limitée à la même information. Présenter deux fois la même information impose un surcoût cognitif sans améliorer la connaissance en mémoire à long terme, c'est la définition même de la charge extrinsèque. Cet effet est probablement dû au renversement lié à l'expertise que nous allons présenter plus bas. Pour les élèves experts, les connaissances sont déjà présentes. Il est donc possible que certaines informations, différentes intrinsèquement, présentées dans les deux modalités sensorielles soient en fait redondantes, car elles activent la même connaissance sans l'améliorer. Utiliser l'effet de modalité pour favoriser l'apprentissage d'élèves novices peut donc détériorer celui d'élèves experts. La méta-analyse de Adesope et Nesbitt (2012) confirme que c'est bien un effet positif de la redondance qui est obtenu chez les novices ($d = 0,29$).

Le principe de segmentation de l'information (9^{ème} principe dans le tableau)

Pour résoudre le problème de surcharge intrinsèque, une méthode consiste à découper la notion en constituants élémentaires qui eux, peuvent être appris. Cette méthode ne permet pas de construire directement une connaissance en mémoire à long terme. En revanche, elle permet de construire des connaissances intermédiaires qui, une fois intégrées, permettront de réduire la charge cognitive intrinsèque en regroupant plusieurs informations dans un seul *chunk* en MdT. Elle permet donc de libérer des ressources pour l'apprentissage ultérieur. La segmentation d'informations permet d'augmenter la quantité d'informations que l'on peut maintenir en MdT et donc de permettre des apprentissages ultérieurs plus complexes. La méta-analyse de (Rey et al. 2019) confirme un effet modéré du principe de segmentation sur la rétention ($d = 0,42$) et le transfert ($d = 0,37$) si et seulement si, la segmentation est commandée par le système.

Ces deux derniers principes, obtenus dans le cadre de la théorie cognitive de l'apprentissage multimédia, sont difficilement explicables par le modèle de Baddeley. Comment expliquer que moins d'informations en MdT fassent plus d'information en MLT ? Comment expliquer que les principes ne fonctionnent qu'avec des novices ?

Les effets d'une mémoire de travail à long terme

Le modèle de MdT à long terme (MdT-LT, Ericsson & Kintsch, 1995) fut proposé en réponse à plusieurs variations de résultats observées en fonction de l'expertise des participants. Dans ce modèle, la MdT à long terme est un mécanisme unitaire ajouté entre la MdT à court-terme et la MLT. Ce registre est unitaire, c'est-à-dire qu'il ne distingue pas de modules esclaves en fonction de la modalité de l'information et qu'il considère que la MdT-LT est une partie activée de la MLT. Ainsi, les informations maintenues en MdT-LT sont des représentations stockées en MLT et activées par un processus attentionnel. Ces connaissances en MLT sont

de plus en plus complexes avec l'augmentation de l'expertise. La MdT-LT est vue, davantage encore que dans le modèle de Baddeley (1986), comme dépendant de l'attention, puisque les informations de la MLT sont activées par des mécanismes attentionnels. Ceci implique d'abandonner complètement la conception de la MdT comme un espace mental de stockage et de manipulation (*e.g.*, James, 1890 ; Cowan, 1988), au profit d'une conception de la MdT comme un processus. Les informations en MdT-LT ont donc un niveau d'activation qui diminue avec le temps, selon l'hypothèse du déclin temporel, et ce déclin est sensible à l'expertise. Plus l'on est expert, moins le niveau d'activation diminue rapidement, tandis que pour les novices, le niveau d'activation de ces mêmes informations diminue d'autant plus rapidement que l'on est novice. Un expert peut donc maintenir actif des quantités d'informations plus grandes, pendant des périodes plus longues, à un moindre coût qu'un novice. La limite de la MdT-LT est donc le niveau d'expertise, l'exigence attentionnelle pour maintenir actives les informations dépendant de ce niveau d'expertise.

Cependant, ce modèle s'affranchit de la modalité de l'information. Dans le cadre de la MdT-LT, l'information en mémoire est un schéma, ou élément de schéma, et donc amodal. La seule MdT-LT n'est donc pas à même de servir de modèle d'interprétation pour des effets déjà établis de la théorie de la charge cognitive ou de l'apprentissage multimédia, tel que le principe de modalité. En revanche, ce modèle permet de rendre compte de résultats empiriques qui étaient inexplicables dans le cadre du modèle en composantes multiples (Baddeley, 1986), tel que le renversement lié à l'expertise ou la redondance d'information liée à l'expertise.

Le principe de renversement lié à l'expertise (1^{er} principe dans le tableau)

Le renversement lié à l'expertise désigne initialement une annulation des effets classiques de la théorie de la charge cognitive pour des élèves plus experts (Kalyuga, Renkl & Paas, 2010). L'expertise permet d'augmenter la quantité d'information contenue dans un *chunk* (*e.g.*, Chase & Simon, 1973). Ainsi, devant un problème à résoudre les novices bénéficient de l'effet du problème résolu, car il réduit la charge cognitive inutile à l'apprentissage. À l'inverse, des élèves plus experts n'en bénéficient plus car la réduction de la charge cognitive ne fait aucune différence pour eux, ils ne sont pas en surcharge cognitive. Ces effets peuvent même devenir négatifs, s'ils imposent aux élèves experts de consacrer des ressources cognitives et du temps d'apprentissage à traiter des informations qu'ils ont déjà apprises. Le renversement lié à l'expertise souligne une limite bien connue de la conception, de situations d'apprentissage, à savoir qu'il faut tenir compte des connaissances antérieures des élèves. Ce principe correspond en partie à la "*aptitude-treatment interaction*" (ATI) mise au jour par Cronbach et Snow (1977).

Le principe du rythme de présentation (14^{ème} principe dans le tableau)

Le rythme de présentation des informations a été étudié car il pouvait affecter les autres effets de la théorie de la charge cognitive. Schmidt-Weigand, Kohnert et Glowalla (2010) ont analysé l'effet du rythme de présentation (lent, moyen ou rapide) et son interaction avec l'effet de modalité : est-ce qu'une vitesse particulière accentue l'effet de modalité ? Ce ne fut pas le cas, et les auteurs conclurent que le rythme de présentation n'avait pas d'effet particulier. Mais quand ils donnèrent le contrôle du défilement (la possibilité de faire des pauses) aux participants, ces derniers ont eu tendance à passer plus de temps sur la tâche et

leur performance d'apprentissage s'est améliorée. Meyer, Rasch et Schnotz (2010) ont aussi obtenu un effet relatif du rythme : une vitesse de défilement rapide focalise l'apprentissage sur les phénomènes globaux, tandis qu'une vitesse lente favorise l'apprentissage de détails. Cependant, en moyenne, le contrôle du défilement a un impact négatif sur l'apprentissage. L'effet positif de la vidéo est obtenu lorsque le défilement de l'animation est piloté par le système ($g = 0,31$) mais pas quand l'animation est contrôlée par l'élève, comme le montre la méta-analyse de Berney et Bétrancourt (2016). Comment expliquer ces résultats qui semblent contradictoires ? La même cause (le contrôle du défilement par les élèves) a des effets différents. En compréhension orale avec élèves dyslexiques en langue maternelle (Tricot, Vandenbroucke, & Sweller, 2020 ; Vandenbroucke & Tricot, 2018), ou avec des élèves ordinaires en classe de langue (Roussel et al., 2008), le même pattern de résultat est obtenu : les élèves qui ont peu de ressources pour réaliser la tâche de compréhension orale peuvent se trouver en difficultés pour prendre le contrôle du défilement. Certains ne font aucune pause, aucun retour en arrière ; d'autres font trop de pauses (une après chaque mot par exemple). Et ces deux stratégies détériorent les performances, qu'on les compare à celles des mêmes élèves sans contrôle du défilement, ou à des élèves plus avancés, qui utilisent de façon plus pertinente le contrôle du défilement. Donner le contrôle aux élèves constituerait une émancipation pour les experts, une double peine pour les novices (Roussel & Tricot, 2014).

Ces résultats mettent en avant une limite majeure des modèles de MdT utilisés par la théorie de la charge cognitive et la théorie cognitive de l'apprentissage multimédia : ils ne prennent pas en compte la dimension temporelle du phénomène étudié. Pour cela, les théories du domaine devaient se tourner vers un nouveau modèle théorique. Le modèle de partage temporel des ressources (modèle TBRS, Barrouillet et Camos, 2015) permet de prendre en compte le temps (Spanjers, van Gog & van Merriënboer, 2010).

Les effets du modèle de partage temporel des ressources (TBRS)

Le modèle TBRS (Barrouillet & Camos, 2015) permet de décrire la sollicitation de la MdT comme un ratio de temps entre les processus de traitement de tâches concurrentes et les processus de rafraîchissement de l'information en MdT. Il permet à la théorie de la charge cognitive d'interpréter les précédents résultats obtenus notamment en étudiant l'impact du rythme de présentation sur l'effet de modalité. Les auteurs de la théorie de la charge cognitive, à la suite des modèles plus classiques de la MdT, se basent sur l'hypothèse que regrouper des informations en *chunks* est un processus actif sollicitant l'attention. La performance d'apprentissage peut donc être vue comme dépendant du ratio temporel entre le temps nécessaire pour regrouper ces informations et le temps restant pour rafraîchir les autres informations en MdT (Puma, Matton, Paubel & Tricot, 2018).

L'effet massé distribué peut-il être expliqué par un épuisement des ressources en mémoire de travail ?

Un résultat majeur en psychologie des apprentissages est la différence entre apprentissages massés et distribués. Une succession de séances d'apprentissage courtes produit de meilleurs effets qu'une séance longue. Ce résultat très solide et très ancien (Chen & Kalyuga, 2020 pour une revue) n'était pas expliqué en termes de processus ni d'architecture cognitive. Chen,

Castro-Alonso, Paas et Sweller (2018) ont proposé d'interpréter cet effet dans le cadre de la théorie de la charge cognitive par la notion d'épuisement des ressources cognitives en MdT (Tricot et al., 2020 pour une revue). Il s'agit d'une forme de fatigue cognitive dont le résultat est une baisse de la performance cognitive suite à un effort cognitif intense et prolongé. Si l'utilisation d'une métaphore musculaire (le cerveau vu comme un muscle) rend l'observation triviale, on est généralement plus fatigué après avoir couru un marathon qu'avant, ce résultat n'est pas évident concernant nos ressources cognitives. La majorité des modèles partent du postulat que notre MdT et notre attention sont des processus stables dans le temps. Ainsi, la capacité de la MdT est toujours considérée fixe et peu d'expérimentations, sinon aucune, n'ont réussi pour l'instant à l'affecter de manière significative. Dans l'hypothèse d'un épuisement des ressources, une sollicitation intensive et prolongée de ces ressources cognitives pourrait diminuer la quantité de ressources disponibles et donc diminuer la performance d'apprentissage.

La charge cognitive augmenterait avec la baisse des ressources disponibles, puisque celle-ci est définie comme la proportion des ressources utilisée. Le modèle TBRS permet de définir la consommation des ressources attentionnelles lors de la réalisation d'une tâche d'apprentissage scolaire exigeante (Puma, Matton, Paubel & Tricot, 2018). Lorsque l'exigence de la tâche est supérieure aux ressources des individus, ces dernières s'épuisent progressivement et, par conséquent, la performance à la tâche diminue.

Tableau 1. Dix-sept principes de conception de situations d'apprentissage fondés sur la prise en compte de la mémoire de travail.

1. Si l'élève est peu avancé.e sur l'apprentissage visé, il est efficace de soulager les traitements en mémoire de travail avec les principes suivants ; mais cette facilitation doit disparaître progressivement (principe de renversement lié à l'expertise, qui s'applique à tous les autres principes)

2. Problème résolu	Donner un problème résolu à étudier plutôt qu'un problème à résoudre, puis alterner les problèmes résolus et les problèmes à résoudre
3. But non spécifique	Ne pas trop spécifier le but du problème, indiquer plutôt à l'élève qu'elle / il doit atteindre tous les buts qu'elle / il peut, faire tout ce qu'elle / il sait faire
4. Multimédia	Présenter un texte illustré par une image pertinente plutôt qu'un texte seul
5. Contiguïté	Quand deux sources d'information doivent être présentées à un.e élève, intégrer les deux sources, dans l'espace et dans le temps
6. Modalité	Utiliser les modalités visuelle et auditive plutôt qu'une seule pour présenter deux informations complémentaires
7. Redondance	On peut utiliser les modalités visuelle et auditive pour présenter deux fois la même information, la même phrase par exemple
8. Cohérence	Éliminer toutes les informations inutiles ou décoratives

9. Segmentation	Si l'information à présenter est complexe (beaucoup d'éléments et de relations), alors la présenter progressivement, partie par partie
10. Variabilité	Ne pas utiliser une série de tâches ayant des caractéristiques de surface similaires, mais plutôt une série de tâches qui diffèrent les unes des autres (en référence aux différences dans le monde réel)
11. Pré-apprentissage	Définir, expliquer ou rappeler les mots, les notions et les objets qui vont être évoqués lors de l'apprentissage
12. Mémoire de travail collective	Si le travail peut être réalisé par l'élève seul.e, alors il doit être réalisé seul ; sinon proposer du travail en groupe, selon un scénario précis
13. Signalement	Guider l'attention des élèves vers l'endroit pertinent au moment pertinent ; synchroniser ce que l'on dit et ce que l'on montre
14. Rythme de présentation	Ralentir le rythme de présentation ou mieux encore introduire des pauses ; réserver le contrôle du défilement aux élèves les plus avancés
15. Information transitoire	Pour une présentation longue, privilégier l'information statique (texte écrit, image fixe) plutôt que transitoire (fichier son ou vidéo sans pause)
16. Animation	Pour apprendre une notion, même dynamique, l'animation n'est pas toujours plus efficace que la succession d'images fixes
17. Mouvement humain	Pour apprendre un geste, ne pas montrer des images statiques ou irréalistes ; présenter plutôt des vidéos montrant des mouvements humains

Conclusion

Dans cet article, nous avons évoqué différentes perspectives et principes de conception de supports d'apprentissage émergeant de l'interaction entre les modèles de la MdT et la recherche en psychologie de l'éducation. Les principes de conception présentés reposent sur les modèles de MdT. Ces principes doivent tenir compte de quatre facteurs : le support d'apprentissage, la tâche d'apprentissage, l'expertise de l'élève et le temps. En retour, la recherche sur les principes de conception de situations d'apprentissage interroge les modèles de la MdT d'une manière que les recherches en laboratoire ne permettent pas. Par exemple, les futurs modèles de la MdT devront répondre à la question soulevée par l'épuisement des ressources en MdT. Les modèles de la MdT ont servi de base théorique pour mettre à jour dix-sept principes de conception de situations d'apprentissage scolaire. Neuf de ces principes ont été présentés dans cet article. Ces principes peuvent être utilisés par les enseignants lorsqu'ils ou elles conçoivent des tâches et des supports d'enseignement ; ils ne sont en rien des méthodes d'enseignement.

Bibliographie

- Adesope, O. O., & Nesbit, J. C. (2012). Verbal redundancy in multimedia learning environments: A meta-analysis. *Journal of Educational Psychology*, 104, 250-263.
- Alpizar, D., Adesope, O. O., & Wong, R. M. (2020). A meta-analysis of signaling principle in multimedia learning environments. *Educational Technology Research and Development*, 68, 2095-2119.
- Anderson, J. R. (2010). *Cognitive psychology and its implications*. Worth Publishers.
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In K. W. Spence & J. T. Spence (Eds.), *The psychology of learning and motivation* (Vol. 2), (pp. 89–195). Academic Press.
- Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. Oxford University Press.
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2015). *Working memory: Loss and reconstruction*. Psychology Press
- Bartlett, F. C. (1932). *Remembering: A study in experimental and social psychology*. Cambridge University Press
- Berney, S., & Bétrancourt, M. (2016). Does animation enhance learning? A meta-analysis. *Computers & Education*, 101, 150-167.
- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and communication*. Pergamon Press.
- Chase, W.G., & Simon, H. A. (1973). The mind's eye in chess. In W.G. Chase, (Ed.). *Visual information processing* (pp. 215-281). Academic Press.
- Chen, O., & Kalyuga, S. (2020). Cognitive load theory, spacing effect, and working memory resources depletion: Implications for instructional design. In S. Hai-Jew (Ed.), *Form, function, and style in instructional design: Emerging research and opportunities* (pp. 1-26). IGI Global.
- Chen, O., Castro-Alonso, J. C., Paas, F., & Sweller, J. (2018). Extending cognitive load theory to incorporate working memory resource depletion: Evidence from the spacing effect. *Educational Psychology Review*, 30, 483–501
- Cowan, N. (1988). Evolving conceptions of memory storage, selective attention, and their mutual constraints within the human information processing system. *Psychological Bulletin*, 104, 163–191.
- Crissman, J. K. (2006). The design and utilization of effective worked examples: A meta-analysis. The University of Nebraska-Lincoln.
- Cronbach, L. J., & Snow, R. E. (1977). *Aptitudes and instructional methods: A handbook for research on interactions*. Irvington.
- De Jong, T. (2010). Cognitive load theory, educational research, and instructional design: some food for thought. *Instructional Science*, 38, 105-134.

- Ericsson, K. A., & Kintsch, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological Review*, 102, 211–245.
- Ginns, P. (2005). Meta-analysis of the modality effect. *Learning & Instruction*, 15, 313–331.
- Guo, D., Zhang, S., Wright, K. L., & McTigue, E. M. (2020). Do you get the picture? A meta-analysis of the effect of graphics on reading comprehension. *AERA Open*, 6, 1-20.
- Höffler, T. N., & Leutner, D. (2007). Instructional animation versus static pictures: A meta-analysis. *Learning & Instruction*, 17, 722-738.
- James, W. (1890). *The principles of psychology*. Henry Holt.
- Jevons, W. S. (1871). The power of numerical discrimination, *Nature*, 3, 281–282.
- Kalyuga, S., Renkl, A., & Paas, F. (2010). Facilitating flexible problem solving: A cognitive load perspective. *Educational Psychology Review*, 22, 175-186.
- Mayer, R. E. (Ed.), (2021). *Multimedia learning* (3rd ed). Cambridge University Press.
- Meyer, K., Rasch, T., & Schnotz, W. (2010). Effects of animation's speed of presentation on perceptual processing and learning. *Learning & Instruction*, 20, 136-145.
- Miller, G. A. (1956). The magical number of seven, plus or minus two. Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 101, 343–352
- Puma, S., Matton, N., Paubel, P.-V. & Tricot, A. (2018). Cognitive Load Theory and time variations: Using the Time-Based Resource Sharing model. *Educational Psychology Review*, 30, 1199-1214.
- Rey, G. D., Beege, M., Nebel, S., Wirzberger, M., Schmitt, T. H., & Schneider, S. (2019). A Meta-analysis of the Segmenting Effect. *Educational Psychology Review*, 31, 389-419.
- Richter, J., Scheiter, K., & Eitel, A. (2016). Signaling text-picture relations in multimedia learning: A comprehensive meta-analysis. *Educational Research Review*, 17, 19-36.
- Roussel, S., & Tricot, A. (2014). Le numérique en classe : émancipation ou double peine ? In S. Brunel. (Ed.), *De la didactique des usages numériques* (pp. 119-140). Éditions universitaires européennes.
- Roussel, S., Rieussec, A., Nespoulous, J.-L., & Tricot, A. (2008). Des baladeurs MP3 en classe d'allemand : l'effet de l'autorégulation matérielle de l'écoute sur la compréhension auditive en langue seconde. *ALSIC*, 11. [journals.openedition.org/alsic/413]
- Schmidt-Weigand, F., Kohnert, A., & Glowalla, U. (2010). A closer look at split visual attention in system- and self-paced instruction in multimedia learning. *Learning & Instruction*, 20, 100-110.
- Schroeder, N. L., & Cenkci, A. T. (2018). Spatial contiguity and spatial split-attention effects in multimedia learning environments: A meta-analysis. *Educational Psychology Review*, 30, 679-701.

Schweppe, J., & Rummer, R. (2014). Attention, working memory, and long-term memory in multimedia learning: An integrated perspective based on process models of working memory, *Educational Psychology Review*, 26, 285-306.

Spanjers, I. A. E., van Gog, T., & van Merriënboer, J. J. G. (2010). A theoretical analysis of how segmentation of dynamic visualizations optimizes students' learning, *Educational Psychology Review*, 22, 411-423

Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, 12, 257–285.

Sweller, J., & Cooper, G. (1985). The use of worked examples as a substitute for problem solving in learning algebra. *Cognition & Instruction*, 2, 59-89.

Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive load theory*. Springer.

Sweller, J., van Merriënboer, J. & Paas, F. (2019). Cognitive architecture and instructional design: 20 years later. *Educational Psychology Review*, 31, 261–292.

Tricot, A., & Sweller, J. (2014). Domain-specific knowledge and why teaching generic skills does not work. *Educational Psychology Review*, 26, 265-283.

Tricot, A., Puma, S., Capa, R., Audiffren, M., André, N., Lespiau, F., Roussel, S., Jeunet, C., Massa, E., Bellec, D., Fonteneau, E. & Charras, P. (2020). Working memory resource depletion effect in academic learning: steps to an integrated approach. In L. Longo, & M.C. Leva (Eds) *Human mental workload: Models and applications*. Communications in Computer and Information Science, vol 1318. Springer.

Tricot, A., Vandenbroucke, G., & Sweller, J. (2020). Using cognitive load theory to improve text comprehension for students with dyslexia. In A.J. Martin, R.A. Sperling, & K.J. Newton (Eds.), *Handbook of educational psychology and students with special needs*. (pp. 339-362). Routledge.

Vandenbroucke, G., & Tricot, A., (2018). La présentation orale de textes narratifs améliore-t-elle la compréhension d'élèves dyslexiques de CM2 ? *Analyse Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, 152, 111-121.