

ACTES DE L'ÉCOLE D'ÉTÉ EN NEUROÉDUCATION 2019

Effets d'espacement et de répétition en contexte scolaireMartin Riopel^{*} et Sophie Olivia McMullin¹

RÉSUMÉ

Les connexions neuronales du cerveau des élèves changent constamment pour permettre d'apprendre et de s'adapter. Cette plasticité cérébrale est influencée par différents facteurs dont l'un des plus importants en contexte scolaire est l'espacement relatif entre plusieurs périodes successives d'études. En effet, de plus en plus de résultats de recherche concernant les effets d'espacement et de répétition montrent que le positionnement judicieux de ces périodes peut faciliter considérablement l'apprentissage et la consolidation des connexions neuronales. Cet article présente quelques-uns de ces résultats et propose des principes facilitant leur mise en application en classe.

¹ Département de didactique, Faculté des sciences de l'éducation, Université du Québec à Montréal, Québec, Canada

* Correspondance avec l'auteur : riopel.martin@uqam.ca

Pour citer cet article : Riopel, M. et McMullin, S. O. (2021). Effets d'espacement et de répétition en contexte scolaire. *Neuroéducation*, 7(1), 13-19.

DOI : <https://doi.org/10.24046/neuroed.20210701.13>

1. Définition et présentation des principaux effets

Avant de commencer la présentation des effets de l'espacement et de la répétition sur les apprentissages, il convient de définir brièvement la notion d'apprentissage. Pour ce faire, le contexte de l'éducatrice convient particulièrement bien. Celle-ci concerne « l'étude quantitative des variables relatives aux apprentissages suscités par l'éducation » (De Landsheere, 1988, p. 59) et se distingue de la psychométrie, par exemple, en mettant l'accent sur l'apprentissage plutôt que sur la performance lors de l'évaluation (Riopel, 2021). L'approche éducatrice de l'apprentissage pose ainsi comme nécessaire la réalisation de deux observations successives pour mesurer un apprentissage donné. Une première observation sert de niveau de base, de référence avec laquelle sera comparée une seconde observation réalisée un peu plus tard, par exemple, après une intervention pédagogique susceptible de produire un effet positif. Dans ce contexte, la notion de répétition devient expérimentalement et conceptuellement indissociable de la notion d'apprentissage. On peut aller encore un peu plus loin et proposer que l'apprentissage résulte même, d'un point de vue évolutif, d'une réaction adaptative à la répétition : un apprentissage donné ne trouvant son utilité que lorsqu'une situation semblable se présente à nouveau. L'expérience récurrente de situations équivalentes ou apparentées pourrait donc soutenir aussi la motivation à apprendre. Enfin, puisque la répétition semble intrinsèquement liée à l'apprentissage, on peut se demander comment mettre en œuvre une ou plusieurs répétitions afin de favoriser certains apprentissages. On peut aussi s'intéresser à l'effet des répétitions rapprochées comparativement aux répétitions éloignées ainsi qu'à l'effet du sommeil entre les répétitions. Les travaux de recherche liés à ces questions ont permis de mettre en évidence plusieurs principes et lois qui gouvernent l'apprentissage et qui sont présentés dans ce qui suit.

Quand on s'intéresse aux travaux de recherche sur l'espacement, un premier élément d'intérêt que l'on pourrait qualifier d'*effet de l'oubli* consiste à modéliser la capacité de rétention dans le temps. Les premières expérimentations effectuées par Ebbinghaus dès la fin du 19^e siècle (1885) avaient montré que la rétention diminue progressivement à mesure que le temps passe. Bien que plusieurs autres recherches de plus en plus précises aient été effectuées depuis, la forme exacte de cette courbe d'oubli est encore débattue aujourd'hui (Averell et Heathcote, 2011). Il ressort cependant clairement de ces travaux que, à la suite d'un premier entraînement réussi, la rétention chute d'abord assez rapidement durant les premiers jours, puis ralentit sa chute progressivement sans jamais se stabiliser complètement. À long terme, l'oubli est donc presque complet et l'apprentissage correspondant, presque nul. Pour éviter cette chute et augmenter l'apprentissage à long terme, on peut répéter le premier entraînement. Dans ce cas, la répétition devient donc bénéfique et nécessaire.

Dans la mesure où sans répétition il y a oubli massif, il convient ensuite de s'intéresser aux travaux de recherche

portant sur les liens possibles entre la répétition et l'apprentissage, et que l'on pourrait qualifier d'*effet des entraînements*. Dès le début du 20^{ème} siècle, la recherche expérimentale a identifié deux effets principaux liés à la répétition : le premier au niveau de l'exactitude et le second au niveau de la vitesse de réponse (Snoddy, 1926). Concrètement, au fil des répétitions, la performance s'améliore d'abord de façon à produire une proportion de plus en plus grande de succès. Simultanément, le délai requis pour réussir diminue aussi au fil des entraînements. En somme, plus on répète, plus on réussit, et plus on réussit rapidement. Encore une fois, la forme précise des courbes obtenues ne fait toujours pas consensus aujourd'hui. Pour le temps de réponse, elle pourrait correspondre à une loi de puissance (Ritter et Schooler, 2001) ou encore à une loi exponentielle (Heathcote, Brown et Mewhort, 2000). Il faut noter, dans tous les cas, que les améliorations ne sont pas toujours régulières. Pour le taux de réussite, par exemple, la forme de la courbe correspond généralement à une sigmoïde : une amélioration lente au début, suivie d'une augmentation rapide et presque verticale qui se conclut par un effet de plateau horizontal lié à la performance maximale d'un individu (Leibowitz *et al.*, 2010). Pour le temps de réponse, on observe plutôt une diminution importante au début qui ralentit ensuite progressivement sur de très grandes échelles (Snoddy, 1926).

2. Combinaison des effets principaux

D'autres effets apparaissent quand on combine dans une même séquence l'effet négatif de l'oubli et l'effet positif des entraînements. On obtient une famille de situations plus complexes comportant différentes durées, différents types de répétitions, ainsi que plusieurs effets liés à la progression de leur espacement relatif. On peut se demander, par exemple, si le fait de répéter un entraînement dix fois durant une même journée a le même effet que de s'entraîner une seule fois par jour durant dix jours? Autrement dit, on peut commencer par étudier l'*effet d'un espacement régulier* entre les entraînements, cet espacement pouvant être plus long, plus court, voire même absent.

Lorsqu'il y a un délai entre deux répétitions, le cerveau est plus activé que lorsque les répétitions s'enchaînent (Callan et Schweighofer, 2010). L'éloignement des répétitions permet de maintenir une activité cérébrale de même niveau d'une répétition à l'autre, alors que le regroupement des répétitions mène à une diminution de l'activité cérébrale en lien avec l'apprentissage. Cette diminution de l'activité cérébrale lorsque les répétitions s'enchaînent a été appelée *repetition suppression effect* (pouvant être traduit par *effet de suppression lié à la répétition*), puisque la répétition trop rapprochée semble supprimer l'activité cérébrale pertinente pour l'apprentissage en cours. La conséquence de l'espacement est donc une plus grande activité cérébrale en lien avec l'apprentissage à la fin de toutes les répétitions, ce qui mène à plus d'apprentissages (*Ibid.*).

Par ailleurs, il a été observé qu'espacer les répétitions favorisait l'implication de la mémoire à long terme (Bradley et al., 2015). Concrètement, espacer amène à devoir récupérer en mémoire à long terme ce qui a été vu ou fait précédemment en réactivant les réseaux de neurones impliqués dans l'apprentissage en cours (*Ibid.*). La récupération en mémoire, cette réactivation des réseaux neuronaux liés à un apprentissage, favorise ainsi la consolidation des apprentissages (Nelson et al., 2013).

Ainsi, l'espacement permet le maintien du niveau d'activation cérébrale et participe à la consolidation des apprentissages en réactivant les réseaux de neurones impliqués dans l'apprentissage. Généralement, plus la répétition est espacée, plus elle favorisera les apprentissages à long terme. Cependant, on comprend qu'il existe vraisemblablement des limites naturelles à cet espacement et on peut se demander ce que les recherches ont permis de dégager à ce propos.

Quand on s'intéresse aux travaux de recherche portant sur la relation entre l'espacement et la répétition, l'*effet du sommeil* est particulièrement fascinant. Il a été observé que, pendant le sommeil, les réseaux neuronaux liés à un apprentissage se réactivent dans un processus apparenté à la répétition qui favorise le renforcement des connexions neuronales et incidemment la consolidation des apprentissages. Antony et ses collègues (2012), par exemple, ont fait apprendre une mélodie au piano à leurs participants. Ensuite, certains d'entre eux ont dormi en écoutant la mélodie. Les chercheurs ont alors observé une activation, pendant le sommeil, des mêmes parties des régions cérébrales motrices que celles utilisées pour jouer les différentes parties de cette mélodie au piano. Ainsi, réentendre pendant le sommeil le contenu appris plus tôt a réactivé les réseaux neuronaux impliqués dans l'apprentissage. Cela a aussi mené à une meilleure performance au piano par la suite, par rapport aux participants qui n'avaient pas entendu la mélodie pendant leur sommeil. La conclusion des chercheurs était alors que la réactivation pendant le sommeil des réseaux neuronaux liés à un apprentissage favorise la consolidation de cet apprentissage et donc les performances ultérieures.

Une expérience similaire avait été menée par Rudoy et ses collaborateurs (2009) et avait montré que les stimuli auditifs entendus pendant le sommeil n'avaient même pas besoin d'être le contenu appris, mais seulement des indices associés antérieurement avec l'apprentissage. Leurs participants devaient apprendre la localisation d'objets. Pour certains objets, un son sans lien particulier avec l'objet était entendu. Pendant le sommeil, ce sont ces sons qui ont été entendus par les participants. Les chercheurs ont observé que pendant la tâche et pendant le sommeil, ce sont les mêmes réseaux de neurones qui se sont activés. Cela montre que les sons, bien que sans lien avec l'apprentissage, ont été encodés avec le contenu à apprendre et que les écouter pendant le sommeil a servi d'indices et de déclencheurs de l'activation des réseaux neuronaux liés à l'apprentissage. Cela s'est accompagné de meilleures performances après la période de sommeil avec les sons, par rapport aux objets qui n'étaient pas associés à des

sons, menant à nouveau à la conclusion que réactiver les réseaux de neurones pendant le sommeil, même indirectement, favorise l'apprentissage.

La procédure de faire entendre des stimuli auditifs pendant le sommeil est cependant fastidieuse et complexe à mettre en œuvre pour certains apprentissages. C'est pourquoi des chercheurs ont voulu savoir si cet effet bénéfique du sommeil pouvait être obtenu même sans stimuli servant d'indice à la réactivation neuronale pendant le sommeil (Bell et al., 2014). Le protocole expérimental se contentait donc de comparer les performances dans un apprentissage après une période de sommeil pour certains participants et après un délai sans sommeil pour d'autres. Les résultats montrent que les participants ayant dormi ont plus appris, et donc que le sommeil a favorisé la consolidation de l'apprentissage sans qu'il soit nécessaire de faire de l'évocation auditive pendant le sommeil.

Quand il est question d'espacement des entraînements ou des répétitions dans le cadre d'un apprentissage, il semble donc pertinent de compter sur les périodes de sommeil quotidiennes pour favoriser l'apprentissage. Le sommeil en lui-même contribue à la consolidation des éléments mis en mémoire (Rasch et Born, 2013), ce qui lui permet de contribuer aux apprentissages.

Une explication des effets du sommeil sur l'apprentissage tient au temps qu'il faut pour que les différents mécanismes cellulaires et moléculaires de renforcement synaptique se mettent en place (Smolen, Zhang et Byrne, 2016). Les mécanismes en question, qui sont complémentaires, vont de quelques secondes à plusieurs jours. Le sommeil permet donc de laisser le temps à plusieurs de ces mécanismes de se mettre en place, donc aux réseaux neuronaux de se renforcer, et donc d'avoir plus d'apprentissage. Au-delà de la question du sommeil, l'existence de différents mécanismes plus ou moins longs de renforcement des connexions neuronales fait ressortir le besoin d'espacer les répétitions. En rapprochant trop les répétitions, les mécanismes de renforcement n'ont pas le temps d'agir afin que les apprentissages puissent être consolidés. Cependant, il faut aussi considérer qu'un espacement trop grand mène à l'oubli (*Ibid.*). Cela suggère qu'il devrait exister un espacement optimal permettant aux mécanismes de renforcement de jouer un rôle suffisant sans augmenter inutilement le délai entre les répétitions.

3. Espacement optimal

La question de l'espacement optimal est particulièrement importante quand on considère des répétitions irrégulières. La figure 1 présente les deux types d'espacement les plus prometteurs selon les chercheurs du domaine, soit l'espacement régulier et l'espacement progressif. Il est à noter que le délai entre le dernier entraînement et le test ne doit pas varier pour que les résultats de recherche puissent être comparés. Dans ces conditions, les travaux sur l'espacement optimal effectués par Cepeda et ses collaborateurs (2009) ont permis d'observer que les

performances pouvaient, dans certains cas, être augmentées de 150 % en choisissant un espacement approprié.

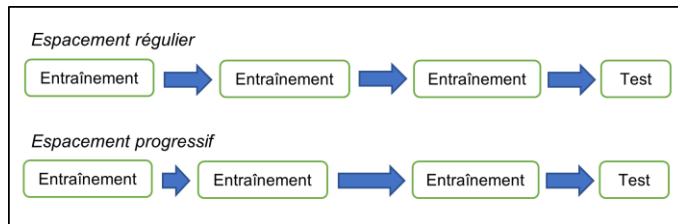


Figure 1. Deux types d'espacement

Afin de mener ces travaux, il fallait d'abord identifier les facteurs en jeu. L'espacement optimal est-il fonction de la durée de rétention souhaitée ou est-il fixe? Quand les répétitions sont supérieures à deux, l'espacement optimal doit-il être constant ou varier entre les répétitions? L'espacement optimal est-il affecté par le domaine d'apprentissage ou la complexité de l'apprentissage?

Plusieurs études laissaient d'abord penser que le premier espacement, c'est-à-dire le temps entre le premier et le second entraînement, était optimalement d'un jour, peu importe le délai de rétention souhaité, c'est-à-dire l'espacement entre le dernier entraînement et le test final (p. ex. Childers et Tomasello, 2002; Glenberg et Lehman, 1980). Cepeda et ses collègues (2009) ont mené deux expériences pour étudier l'impact de différents espacements entre deux répétitions en fonction de la durée totale de rétention souhaitée. Dans la première expérience, le test final avait lieu 10 jours après le dernier entraînement. Les espacements expérimentés allaient de cinq minutes à 14 jours. Dans la seconde expérience, le test final avait lieu six mois après le dernier entraînement, et les espacements allaient de 5 minutes à 6 mois. Il est intéressant de préciser que les espacements inférieurs à un jour donnaient les plus mauvais résultats aux tests finaux dans les deux expériences, même comparés à de très longs espacements qui étaient pourtant associés à plus d'oubli entre les répétitions. Cela renforce l'idée qu'espacer est nécessaire. Concernant le cœur de ces expériences, elles ont montré que l'espacement d'une journée était optimal pour un délai de 10 jours avant le test final, mais qu'un espacement de 28 jours était optimal pour un délai de six mois entre le dernier entraînement et le test final (*Ibid.*). Cela a mené les chercheurs à conclure que l'espacement optimal semble varier avec le délai de rétention sans entraînement souhaité. Autrement dit, l'espacement, pour être optimal, devrait être ajusté en fonction de la durée entre le dernier entraînement et le test final concernant un même apprentissage. Dans leur étude, Cepeda et ses collaborateurs (2009) ont calculé, d'après leurs résultats et ceux d'autres expériences similaires, que l'espacement optimal correspondrait à un ratio de 1:1 pour des durées de rétentions très courtes (inférieures à une journée), donc un espacement entre les répétitions égal à la durée du délai avant le test final après la dernière répétition. L'espacement devrait être plus près de 10 % de la durée de rétention souhaitée quand le test final a lieu plusieurs jours après le dernier entraînement.

Lorsque le nombre de répétitions, d'entraînements, avant le test final est supérieur à deux, se pose la question de la constance ou de la variabilité de l'espacement. Une étude menée par Kang et ses collègues (2014) a comparé l'effet d'espacements réguliers et d'espacements progressifs. Ils n'ont observé aucune différence significative sur les performances finales. Autrement dit, conserver le même espacement entre toutes les répétitions ou commencer avec de brefs espacements pour les allonger au fur et à mesure des répétitions ne semble pas avoir d'impact sur les résultats finaux. Ils ont cependant relevé un effet sur les performances minimales lors de chacune des répétitions. Lorsque l'espacement est maintenu constant à travers les répétitions, les performances minimales sont moins bonnes au début comparativement au cas dans lequel l'espacement est progressivement augmenté. En somme, pratiquer l'espacement constant revient à appliquer strictement le principe d'espacement, quel que soit le nombre d'entraînements, en ajustant le délai entre les répétitions en fonction de la durée de rétention souhaitée avant le test final. Cependant, si le test final est très loin dans le temps, cela va mener à choisir des délais assez longs entre les répétitions. Cela favorise donc un oubli important entre les répétitions. Pratiquer l'espacement progressif, à l'inverse, va limiter l'oubli entre les répétitions en ayant des délais plus rapprochés au début, favorisant de meilleures performances lors des répétitions comparativement à un espacement constant.

Dans la mesure où la performance finale, et donc l'apprentissage total, est semblable, recourir à un espacement régulier ou progressif ne devrait pas être important. Il faut cependant considérer l'effet sur les apprenants, au cours de l'apprentissage, de réaliser de moins bonnes performances. Cela joue sur le maintien de la motivation à apprendre (Kang et al., 2014). Vivre des réussites est un des facteurs motivationnels pour persévérer dans un apprentissage (Garon-Carrier et al., 2016). En somme, en augmentant progressivement l'espacement entre deux entraînements, on limite l'oubli entre les répétitions, ce qui permet d'obtenir de meilleures performances à chacune des répétitions par rapport à un espacement régulier, ce qui tend à favoriser la motivation à poursuivre ses apprentissages. Bien que l'effet final sur la performance ne soit pas significativement différent quand on compare un espacement régulier et un espacement progressif, l'effet sur la performance minimale est significatif et peut avoir un impact sur la motivation à plus long terme. Il semble donc qu'il faille privilégier l'espacement progressif.

Les derniers facteurs à considérer sont liés aux circonstances dans lesquelles a lieu l'espacement. La recherche tend à montrer que le contexte d'apprentissage, l'âge des apprenants, le domaine d'apprentissage et même la complexité de l'apprentissage n'influent pas significativement sur les effets de l'espacement (Gerber et Toppino, 2015). Cela suggère que l'effet de l'espacement est assez universel, qu'il s'agit d'un mécanisme fondamental du cerveau en ce qui a trait à l'apprentissage, ce qui est renforcé par l'observation des mêmes effets chez les animaux (*Ibid.*). Cet effet a aussi été

classé au 12^e rang des variables présentant les meilleurs niveaux de preuve scientifique avec une taille d'effet de 0,71 – un effet fort donc – par Hattie (2009).

4. Mise en pratique

Le portrait global de l'espacement ayant été dressé, il convient de se tourner vers les questions liées à son application. Considérer l'espacement dans le cadre des apprentissages ne peut se limiter qu'à la recherche fondamentale. Ainsi, proposer que la rétention, les répétitions, l'espacement régulier ou l'espacement progressif sont des facteurs de réussites amène à s'interroger sur les aspects concrets de ces pratiques.

À l'heure actuelle, il n'existe pas de modèle consensuel parmi les chercheurs et permettant de tracer une courbe d'apprentissage qui permette de rendre compte de tous les effets connus. Ainsi, toute mise en pratique ne peut donc relever que de la suggestion. À la suite d'une expérience d'apprentissage de noms d'oiseaux et de constellations menée dans notre laboratoire (Riopel *et al.*, 2017 et 2019), un modèle d'espacement a été dégagé, qui se veut une synthèse des effets connus de l'espacement. La première étape étant de chercher à atteindre le niveau de performance souhaité, et ensuite de le maintenir jusqu'à la fin du processus d'apprentissage.

Atteindre un niveau de performance en particulier est un objectif différent de celui de maintenir ledit niveau de performance. Le but du premier est une augmentation de la performance en appliquant le principe de répétition pour mieux réussir et en espaçant pour favoriser la consolidation des apprentissages. Il n'est cependant pas nécessaire d'augmenter l'espacement dans ce cas. Au contraire, dans ce contexte d'amélioration de la performance, un espacement constant sera plus approprié (Riopel *et al.*, 2019) L'espacement optimal reflètera le délai disponible pour que les apprenants atteignent le niveau de performance désiré.

Une fois le niveau souhaité atteint, il faut le maintenir dans le temps. Il s'agit donc d'espacer les répétitions afin de continuer à renforcer l'apprentissage. Ici, un espacement progressif sera plus approprié pour maintenir la motivation des apprenants dans le temps (Kang *et al.*, 2014). Le modèle créé propose que la première répétition ait lieu au jour 1, la deuxième au jour 2², c'est-à-dire quatre jours plus tard, la troisième au jour 3², donc neuf jours plus tard, la quatrième au jour 4², etc. Cette progression favorise de bonnes performances tout au long de l'apprentissage et peut s'allonger indéfiniment pour s'adapter à des durées de rétention très longues. Cette progression de l'espacement favorise aussi une meilleure rétention à long terme, comparativement aux répétitions moins espacées telles les séances de révision intensives en période d'examens (Gerbiere et Toppino, 2015).

Le modèle proposé ci-dessus permet d'avoir une illustration possible de l'application de l'espacement. Espacer revêt cependant un caractère encore plus terre à terre : au niveau

du contenu, qu'est-ce qui peut être entendu par espacer les séances d'apprentissage? Certains auteurs ont apporté des éléments de réponses, d'autres sont des suggestions de notre part. Cepeda et ses collaborateurs (2009) suggèrent d'éviter les cours intensifs, car le peu d'espacement mènera à développer des capacités à court terme. Ils proposent aussi le recours aux examens cumulatifs afin de générer de l'espacement entre les périodes d'étude d'un même contenu. Dans le même ordre d'idée, nous pensons que l'utilisation des devoirs comme outil d'espacement est pertinente : cela contribue à revoir du contenu déjà étudié, donc à réactiver des apprentissages réalisés un ou plusieurs jours auparavant. En continuité avec l'idée de réactiver les apprentissages antérieurs et ainsi pratiquer l'espacement, Carpenter (2012) suggère de faire, lors de chaque leçon, un court rappel de ce qui a été vu la veille ou il y a plus longtemps selon le contenu pertinent. Ces brefs retours non exhaustifs permettent de raviver les apprentissages de façon périodique. De façon complémentaire, toujours dans l'idée de favoriser l'espacement, nous voudrions attirer l'attention sur le potentiel des liens entre les contenus. Faire des liens implique de reparler d'éléments déjà appris et donc cela revient à pratiquer l'espacement. De multiples façons sont possibles pour exploiter ce type d'espacement. Faire appel aux souvenirs des élèves, utiliser des manuels qui n'ont pas des chapitres hermétiques les uns aux autres, varier les contextes d'apprentissage pour un même contenu. En plus d'être un facteur d'espacement, faire des liens permet, pour chaque nouvelle notion, de l'associer à du contenu déjà connu avec lequel l'apprenant se sent déjà compétent. Cela fait ressortir l'aspect utile du contenu déjà appris, puisqu'il doit resservir dans les notions suivantes, jouant ainsi sur la motivation à apprendre. Cela permet de voir le contenu dans des contextes divers et de l'entremêler avec d'autres contenus, permettant d'en dégager ce qui est invariant, et donc de mieux cerner l'apprentissage et de parvenir à sélectionner les apprentissages adéquats selon les situations.

5. Conclusion

Globalement, l'analyse des recherches dans ce domaine appuie l'idée que les effets d'espacement et de répétition sont des outils pertinents en contexte scolaire. Le positionnement optimal des périodes successives d'apprentissage pour un même contenu (régulier pour augmenter les performances, progressif pour les maintenir) est associé à de meilleures performances, favorise la motivation et produit plus de rétention et d'apprentissage à long terme. Bien que cela puisse être contraignant à mettre en application, les effets observés robustes, importants et relativement invariants par rapport aux différents contextes et aux différents domaines permettent d'en recommander l'application systématique à grande échelle.

Références

- Antony, J. W., Gobel, E. W., O'Hare, J. K., Reber, P. J. et Paller, K. A. (2012). Cued memory reactivation during sleep influences skill learning. *Nature Neuroscience*, 15(8), 1114-1116. <https://doi.org/10.1038/nn.3152>
- Averell, L. et Heathcote, A. (2011). The form of the forgetting curve and the fate of memories. *Journal of Mathematical Psychology*, 55(1), 25-35. <https://doi.org/10.1016/j.jmp.2010.08.009>
- Bell, M. C., Kawadri, N., Simone, P. M. et Wiseheart, M. (2014). Long-term memory, sleep, and the spacing effect. *Memory*, 22(3), 276-283. <https://doi.org/10.1080/09658211.2013.778294>
- Bradley, M. M., Costa, V. D., Ferrari, V., Codispoti, M., Fitzsimmons, J. R. et Lang, P. J. (2015). Imaging distributed and massed repetitions of natural scenes: Spontaneous retrieval and maintenance. *Human Brain Mapping*, 36(4), 1381-1392. <https://doi.org/10.1002/hbm.22708>
- Callan, D. E. et Schweighofer, N. (2010). Neural correlates of the spacing effect in explicit verbal semantic encoding support the deficient-processing theory. *Human Brain Mapping*, 31(4), 645-659. <https://doi.org/10.1002/hbm.20894>
- Carpenter, S. K. (2012). Testing enhances the transfer of learning. *Current Directions in Psychological Science*, 21(5), 279-283. <https://doi.org/10.1177/0963721412452728>
- Cepeda, N. J., Coburn, N., Rohrer, D., Wixted, J. T., Mozer, M. C. et Pashler, H. (2009). Optimizing distributed practice: Theoretical analysis and practical implications. *Experimental Psychology*, 56(4), 236-246. <https://doi.org/10.1027/1618-3169.56.4.236>
- Childers, J. B. et Tomasello, M. (2002). Two-year-olds learn novel nouns, verbs, and conventional actions from massed or distributed exposures. *Developmental Psychology*, 38(6), 967-978. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.38.6.967>
- De Landsheere, V. (1988). *Faire réussir, faire échouer: la compétence minimale et son évaluation*. Paris, France : Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.delan.1988.01>
- Ebbinghaus, H. (1885). *Über das gedächtnis: untersuchungen zur experimentellen psychologie*. Leipzig, Allemagne : Duncker & Humblot.
- Garon-Carrier, G., Boivin, M., Guay, F., Kovas, Y., Dionne, G., Lemelin, ... et Tremblay, R. E. (2016). Intrinsic motivation and achievement in mathematics in elementary school: A longitudinal investigation of their association. *Child Development*, 87(1), 165-175. <https://doi.org/10.1111/cdev.12458>
- Gerbier, E. et Toppino, T. C. (2015). The effect of distributed practice: Neuroscience, cognition, and education. *Trends in Neuroscience and Education*, 4(3), 49-59. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2015.01.001>
- Glenberg, A. M. et Lehmann, T. S. (1980). Spacing repetitions over 1 week. *Memory & Cognition*, 8(6), 528-538. <https://doi.org/10.3758/BF03213772>
- Hattie, J. (2009). *Visible learning: A synthesis of over 800 meta-analyses relating to achievement*. Londres, Royaume-Uni : Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203887332>
- Heathcote, A., Brown, S. et Mewhort, D. J. (2000). The power law repealed: The case for an exponential law of practice. *Psychonomic Bulletin & Review*, 7(2), 185-207. <https://doi.org/10.3758/BF03212979>
- Kang, S. H., Lindsey, R. V., Mozer, M. C. et Pashler, H. (2014). Retrieval practice over the long term: Should spacing be expanding or equal-interval?. *Psychonomic Bulletin & Review*, 21(6), 1544-1550. <https://doi.org/10.3758/s13423-014-0636-z>
- Leibowitz, N., Baum, B., Enden, G. et Karniel, A. (2010). The exponential learning equation as a function of successful trials results in sigmoid performance. *Journal of Mathematical Psychology*, 54(3), 338-340. <https://doi.org/10.1016/j.jmp.2010.01.006>
- Nelson, S. M., Arnold, K. M., Gilmore, A. W. et McDermott, K. B. (2013). Neural signatures of test-potentiated learning in parietal cortex. *Journal of Neuroscience*, 33(29), 11754-11762. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0960-13.2013>
- Rasch, B. et Born, J. (2013). About sleep's role in memory. *Physiological Reviews*, 93(2), 681-766. <https://doi.org/10.1152/physrev.00032.2012>
- Riopel, M. (2021). La naissance et l'enfance de l'éducatrice. Dans C. B. da Costa, I. Nizet et D. Leduc (dir.), *40 ans de mesure et d'évaluation* (p. 151-160). Québec, QC : Presses de l'Université du Québec. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1n35d9q.16>
- Riopel, M., Chastenay, P., Fortin-Clément, G., Potvin, P., Masson, S. et Charland, P. (2017). Using invariance to model practice, forgetting and spacing effect. *EDULEARN17 Proceedings*, 4334-4341. <https://doi.org/10.21125/edulearn.2017.1935>
- Riopel, M., Chastenay, P., Roy, L. et Choquette, L. (2019). Application d'un nouveau modèle basé sur trois hypothèses d'invariance d'échelle à des séquences d'identification de photographies d'oiseaux et de constellations. *Actes du 31e colloque de l'ADMEE-Europe*. Université du Lausanne, 4 p. <http://www.riopel.uqam.ca/id/admee2019riopel.pdf>

- Ritter, F. E. et Schooler, L. J. (2001). The learning curve. Dans N. J. Smelser et P. B. Baltes (dir.), *International encyclopedia of the social and behavioral sciences* (p. 8602-8605). Oxford, Royaume-Uni : Pergamon.
- Rudoy, J. D., Voss, J. L., Westerberg, C. E. et Paller, K. A. (2009). Strengthening individual memories by reactivating them during sleep. *Science*, 326(5956), 1079-1079. <https://doi.org/10.1126/science.1179013>
- Smolen, P., Zhang, Y. et Byrne, J. H. (2016). The right time to learn: Mechanisms and optimization of spaced learning. *Nature Reviews. Neuroscience*, 17(2), 77-88. <https://doi.org/10.1038/nrn.2015.18>
- Snoddy, G. S. (1926). Learning and stability: A psychophysiological analysis of a case of motor learning with clinical applications. *Journal of Applied Psychology*, 10(1), 1-36. <https://doi.org/10.1037/h0075814>