

---

RECHERCHE EXPÉRIMENTALE

**L'influence de la gestuelle sur la charge cognitive en  
contexte d'apprentissage des mathématiques sur application  
éducative numérique**

Marie-Laure Di Fabio<sup>1\*</sup>, Sylvain Sénécal<sup>1</sup>, Pierre-Majorique Léger<sup>1</sup> et Patrick Charland<sup>2</sup>

RÉSUMÉ

La préoccupation grandissante de proposer des applications numériques adaptées aux enfants, notamment dans la sphère éducative, nous pousse à étudier l'interaction enfant-machine en considérant plusieurs dimensions : cognitive et comportementale. La dimension comportementale de l'enfant, plus précisément le rôle de la gestuelle lorsque celui-ci interagit avec l'appareil, n'est que trop peu abordée, bien que cette variable soit considérablement liée à l'apprentissage des enfants dans divers domaines : apprentissage des langues ou des mathématiques. Cette recherche a donc pour objectif d'étudier l'importance de la gestuelle (spécifiquement les mouvements des mains) quant à son impact direct sur la charge cognitive de l'enfant, tout en considérant un effet modérateur sur le lien entre la difficulté d'une tâche et la charge cognitive induite dans un contexte de résolution de problèmes mathématiques sur tablette numérique. Pour ce faire, nous manipulons la difficulté des questions auxquelles l'apprenant répondra. Une observation non participante nous permet de relever les comportements de l'enfant et d'obtenir les mesures liées à la gestuelle : mouvement lié au geste de pointer du doigt ou de dénombrer. La charge cognitive de l'enfant est saisie de manière oculométrique, nous révélant moyenne et écart-type pupillaires. Nos résultats suggèrent que la difficulté d'une question a un effet positif sur la charge cognitive de l'apprenant. De plus, l'utilisation des doigts pour pointer ou compter influence négativement les variations de la charge cognitive de l'apprenant.

---

<sup>1</sup> HEC Montréal, Tech3Lab, Montréal, Canada

<sup>2</sup> Université du Québec à Montréal, Faculté des sciences de l'éducation, Département de didactique, Montréal, Canada

\*Correspondance avec l'auteure : [marie-laure.di-fabio-becker@hec.ca](mailto:marie-laure.di-fabio-becker@hec.ca)

**Pour citer cet article :** Di Fabio, M.-L., Sénécal, S., Léger, P.-M. et Charland, P. (2018). L'influence de la gestuelle sur la charge cognitive en contexte d'apprentissage des mathématiques sur application éducative numérique. *Neuroéducation*, 5(1), 13-25.

**DOI :** <https://doi.org/10.24046/neuroed.2018050113>

Reçu le 19 janvier 2017. Révision reçue le 11 août 2017.

Accepté le 17 septembre 2017. Publié en ligne le 1<sup>er</sup> mars 2018.

*Neuroéducation*, 5(1), 13-25

ISSN : 1929-1833

Tous droits réservés © 2018 – Association pour la recherche en neuroéducation / Association for Research in Neuroeducation

## 1. Introduction

La littérature dans le domaine l'interaction enfant-machine (IEM) nous renseigne sur l'usage des technologies dans un contexte d'apprentissage numérique. Ces études tentent de répondre à des questions telles que : 1) Comment intégrer de manière efficace les technologies au sein d'un cours conduit en classe (Cuendet et al., 2015)?; 2) En quoi l'usage des livres électroniques rendrait-il l'enseignement personnalisé et adapté à l'étudiant (Huang et al., 2012)?; 3) Comment l'utilisation de jeux vidéo éducatifs peut-elle améliorer la performance de l'apprenant (Durkin et al., 2013; Sung, Hwang et Yen, 2015)?; et 4) Quel est le rôle de l'iPad quant à l'éveil de l'enfant en bas âge (Price, Jewitt et Crescenzi, 2015)? Plus spécifiquement dans un contexte d'apprentissage des mathématiques, des études montrent que l'utilisation de technologies facilite l'assimilation de certains concepts notamment grâce à un rythme déterminé par l'apprenant et par une séquence établie de progression (Bruce et Ross, 2009) et que différents apprenants tirent avantage de différents éléments de la technologie pour apprendre (p. ex. rétroaction, exemples nombreux; Moyer-Packenham et Suh, 2012).

Cependant, bien que les recherches antérieures dans le domaine des IEM aient étudié le phénomène d'apprentissage des enfants dans un environnement numérique, certains facteurs restent à étudier. Entre autres, la dimension comportementale de l'enfant, plus précisément le rôle de la gestuelle lorsque celui-ci interagit avec l'appareil, n'est ainsi pas traitée (Read et Markopoulos, 2013), bien que cette variable soit intimement liée à l'apprentissage des enfants.

Plusieurs chercheurs ont étudié le lien entre l'apprentissage et le mouvement, notamment chez les enfants (April, 2010; Bouchard et Fréchette, 2011; Shoal, 2011). En effet, il a largement été démontré que la gestuelle a un impact positif sur la cognition dans la mesure où elle libère des ressources mentales favorisant une meilleure assimilation des concepts liés à une tâche spécifique (Broaders et al., 2007; Novack et Goldin-Meadow, 2015), tout en contribuant à la réussite scolaire des enfants (Tompsonski et al., 2008). La gestuelle a un rôle prépondérant quant au cheminement académique des jeunes apprenants, qui plus est dans un contexte où la technologie gagne du terrain parmi les méthodes d'enseignement et d'apprentissage utilisées dès le plus jeune âge des étudiants (Cheng, Lu et Yang, 2015; Cox, 2012). Si l'on fait référence à l'apprentissage des mathématiques, des études montrent que la gestuelle, notamment l'utilisation des doigts facilite certaines opérations chez les jeunes apprenants (Berteletti et Booth, 2015; Lafay et al., 2013).

Cette étude vise donc à étudier l'importance de la gestuelle (spécifiquement les mouvements des mains) quant à son impact sur la charge cognitive et la performance de l'enfant, dans un contexte de résolution de problèmes mathématiques sur tablette numérique. En d'autres termes, il s'agit de savoir si une partie des résultats ayant trait à la performance de l'enfant lorsque celui-ci résout des

problèmes mathématiques sur tablette est liée à la gestuelle « hors tablette », et non pas seulement à l'IEM. La dimension comportementale de l'expérience utilisateur de l'enfant pourrait alors être exploitée afin de développer des applications pédagogiques de meilleure qualité.

## 2. Revue de littérature et hypothèses

### 2.1 Théorie de la charge cognitive

La théorie de la charge cognitive est l'une des théories fondamentales en psychologie lorsque l'on aborde la cognition dans un contexte d'apprentissage (Sweller, Ayres et Kalyuga, 2011), y compris lorsqu'il s'agit d'apprentissage numérique (Lang, 2007). Sweller et al. (2011) suggèrent que la résolution de problèmes est permise par un réseau de schémas (c.-à.-d. de structures cognitives ayant une influence sur l'encodage et récupération d'informations [Ghosh et Gilboa, 2014]), particulièrement bien organisé et étoffé, contenu dans la mémoire à long terme. La mémoire de travail a pour rôle d'assurer la construction et la consolidation de ce réseau de schémas. Or, cette dernière est limitée dans sa capacité ainsi que dans sa durée lorsque l'information reçue est nouvelle. Si la quantité d'informations à traiter par l'apprenant devait être supérieure à ce seuil maximal d'assimilation et de stockage à court terme, la charge cognitive demeurerait trop élevée, la mémoire de travail serait surchargée, entraînant ainsi une mauvaise intégration à long terme du contenu, induisant par conséquent une mauvaise performance de l'apprenant (Sweller, 1988).

Ce phénomène est à considérer d'autant plus sérieusement dans le cas où le sujet est un enfant. En effet, un enfant âgé de 8 ans retient en moyenne deux fois moins d'informations qu'un adulte, pour un même contenu présenté (Kharitonova, Winter et Sheridan, 2015). Dans le même ordre d'idées, l'étude conduite par O'Hare et al. (2008) stipule que l'on observe une activation moindre des régions cérébrales sollicitées lors d'activités liées à la mémoire de travail chez les enfants, par rapport aux adultes. Il s'agit donc de veiller à ce que cette charge cognitive, impliquée dans le processus d'apprentissage, soit minimisée afin de permettre l'assimilation optimale du contenu présenté. Enfin, Xie et Salvendy (2000) considèrent que la charge cognitive fluctue dans le temps, n'est pas constante et affiche donc des pics ainsi qu'une moyenne sur une période donnée.

### 2.2 Les types de charges cognitives

Selon Pass, Renkl et Sweller (2003), il existe trois types de charges lorsque l'on parle de charge cognitive. Celles-ci sont additives et soumises à une contrainte : la limitation des ressources disponibles à court terme. Si cette somme de charges se voyait excédentaire à la capacité maximale de mémoire de travail, nous nous trouverions en situation de surcharge cognitive, nuisant fortement à l'apprentissage du sujet (Fayol, Largy et Lemaire, 1994). Ainsi, chercheurs,

pédagogues et designers tentent de concevoir et d'utiliser des produits et méthodes visant à réduire cette charge cognitive, afin de favoriser l'apprentissage des enfants.

La première charge cognitive, charge intrinsèque, est inhérente à la structure et à la complexité de la tâche (Pollock, Chandler et Sweller, 2002). Le degré de complexité du contenu dépend du nombre et du degré d'interactions auprès des éléments à traiter. En d'autres termes, « une tâche sera jugée complexe lorsque celle-ci présentera un nombre d'informations à analyser élevé, sollicitant fortement la mémoire de travail, nécessaire à la compréhension du contenu présenté » (Brunken, Plass et Leutner, 2003, p. 54, traduction libre). Ainsi, aucune manipulation expérimentale relative au format de présentation de l'information ne peut l'altérer. Seule une tâche plus simple, qui implique moins d'interactions avec les éléments à traiter, amoindrira cette charge mentale (Paas et al., 2003).

La charge extrinsèque est, quant à elle, directement liée au format ainsi qu'à la manière dont l'information est présentée (Cooper et Sweller, 1987; Sweller et al., 2011). En effet, l'élaboration des instructions, la création d'une application ergonomique (dans un contexte numérique) ou le choix du design des questions liées à la tâche sont étroitement liés à l'intensité de cette charge. Ce type de charge est donc facilement contrôlable par le chercheur, celui-ci étant à même de la diminuer en offrant au répondant une présentation optimale de l'information. Par ailleurs, la charge extrinsèque ne contribue pas à la compréhension à proprement parler de la tâche, puisqu'elle n'est en aucun cas liée à la construction de schémas ou d'automatismes d'apprentissage.

À titre d'exemple, « toute consigne requérant que l'apprenant recherche activement une partie de l'information non contenue dans les explications sera vecteur d'augmentation de la charge cognitive extrinsèque puisque les ressources mobilisées pour cette tâche ne contribuent d'aucune façon à l'assimilation du contenu » (Paas et al., 2003, p. 2, traduction libre). Celle-ci doit, par conséquent, être minimisée par le chercheur (Cooper et Sweller, 1987; Sweller et al., 2011). Ceci est d'autant plus vrai lorsque la charge intrinsèque est élevée, puisque l'on rappelle que les deux catégories de charge s'additionnent et sont contraintes par la capacité maximale de la mémoire de travail (Paas et al., 2003).

Autant les charges intrinsèques et extrinsèques sont dépendantes de l'information présentée, autant la charge cognitive germane dépend des caractéristiques de l'apprenant (Sweller, 2010). En effet, cette dernière fait référence aux ressources dédiées à la création de schémas d'apprentissage et d'automatismes liés à la tâche (Paas et Van Gog, 2006). Ces schémas permettent d'agréger plusieurs bribes d'informations en une seule et même notion associée à une fonction particulière, réduisant de ce fait l'effort fourni pour effectuer la tâche. Ainsi, la capacité restante de la mémoire de travail suite à l'allocation de

ressources aux charges intrinsèque et extrinsèque pourra être allouée à la charge germane (Sweller, 2010).

Pour résumer, la somme des trois catégories de charge cognitive ne doit pas excéder les ressources associées à la mémoire de travail. De plus, la charge cognitive intrinsèque est irrépressible, à moins de tronquer la quantité d'informations intrinsèques à la tâche. À une période  $p$ , cette charge conditionne en premier lieu l'allocation des ressources disponibles. La charge cognitive disponible restante est donc répartie entre les charges cognitives extrinsèque et germane. Une minimisation de la charge extrinsèque permet d'accroître l'apprentissage du sujet par l'élaboration de schémas et de construits.

Hypothèse 1: Dans un contexte d'apprentissage des mathématiques sur tablette numérique, la difficulté de la tâche a une influence positive sur la charge cognitive moyenne durant la tâche.

### 2.3 La gestuelle et la charge cognitive

Dans un premier temps, la gestuelle est souvent associée à son rôle communicationnel. C'est notamment le cas pour les adultes, dont 90 % des gestes sont produits pour accompagner un discours (McNeill, 1992). Par ailleurs, la gestuelle se révèle également utile puisque celle-ci informe parents et corps professoral quant au niveau d'assimilation ou de compréhension d'un concept par un enfant. En effet, Alibali et Goldin-Meadow (1993) ont constaté à maintes reprises qu'un enfant assimilant un nouveau concept, ou nouveau construit, avait tendance à faire valoir ses propos en produisant des gestes lorsqu'il l'expliquait auprès d'interlocuteurs.

L'utilisation de la gestuelle favorise l'assimilation d'informations puisqu'elle permet de réduire la demande cognitive pour effectuer une tâche (p. ex. parler). En effet, certaines études démontrent qu'utiliser de ses membres libère des ressources de mémoire de travail, normalement associées à une activité spécifique. Ce dégagement de ressources permet de les allouer à une autre activité, telle que celle de comprendre et résoudre un nouveau problème (Glenberg et Robertson, 1999; Goldin-Meadow et al., 2001; Hu, Ginns et Bobis, 2015; Wagner, Nusbaum et Goldin-Meadow, 2004). Les résultats de l'étude de Goldin-Meadow et al. (2001) démontrent que la gestuelle réduit la charge cognitive induite par une tâche (charge cognitive intrinsèque) et libère des ressources nécessaires à l'apprentissage. En effet, les auteurs avancent que certains gestes transmettent les mêmes idées que celles exprimées verbalement, en mobilisant une dimension visuospatiale et non orale. Cette différence quant au moyen de représenter l'idée enrichit le codage ainsi que le traitement de l'information, réduisant de ce fait l'effort associé à la tâche. La production de gestes réduit donc la charge cognitive nécessaire pour effectuer une tâche et augmente la capacité mémorielle d'un individu.

Par ailleurs, de nombreuses recherches démontrent que le mouvement est lié à la cognition des enfants ainsi qu'à leurs

résultats scolaires (Bartholomew et Jowers, 2011; Donnelly et Lambourne, 2011; Erickson, Hillman et Kramer, 2015; Fedewa et Ahn, 2011; Tomporowski et al., 2008). Ce constat s'applique dans divers domaines, tels que l'étude des langues (Glenberg, Goldberg et Zhu, 2011; Glenberg et al., 2004) et des sciences au sens large (Ping et Goldin-Meadow, 2008; Ping et Goldin-Meadow, 2010) en particulier dans un contexte d'étude des mathématiques (Goldin-Meadow, Cook et Mitchell, 2009). En effet, selon Novack et Goldin-Meadow (2015), la gestuelle peut être intégrée dans diverses approches d'enseignement, plus spécifiquement dans le cas de résolutions mathématiques complexes pour les très jeunes enfants.

#### 2.4 Gestuelle et apprentissage

Selon Hu et al. (2015), l'une des principales manières d'interagir avec notre environnement consiste à utiliser nos mains. En effet, les auteurs démontrent que le mouvement de la main, ainsi que son positionnement peuvent avoir une influence sur le processus cognitif d'un individu. Le fait de placer sa main proche d'un objet altère la vision d'un individu dans le sens où l'objet de l'attention se démarque de ce qui l'entoure (Cosman et Vecera, 2010), et recevra plus d'intérêt qu'il ne le mérite (Reed, Grubb et Steele, 2006). Certains gestes principalement ceux liés à l'utilisation des doigts sont vecteurs d'interaction avec l'environnement de l'enfant, mais sont également gage d'apprentissage.

Le geste de montrer ou de pointer du doigt, en touchant ou non un quelconque objet ou une surface, affecte le traitement d'information de l'enfant, favorisant son apprentissage (Hu et al., 2015). De nombreuses recherches abordant le lien entre l'attention d'un point de vue visuel et la position de la main démontrent que le pointage est d'une véritable aide lorsqu'une personne désire désigner un objet ou quelqu'un (Hu et al., 2015). Ceci se révèle particulièrement pertinent dans un contexte de résolution de problèmes mathématiques (notamment la géométrie) présentant un important contenu relatif à l'espace. Le pointage permet à l'enfant de modéliser et de se représenter l'objet de manière spatiale, l'aidant de ce fait à traiter l'information présentée (Fischer et Hoellen, 2004). Enfin, selon Liszkowski et al. (2012), ce geste est relativement intuitif dès le plus jeune âge : « un des moyens les plus caractéristiques de la communication humaine pré langagière est le geste de pointer, émergeant vers l'âge d'un an » (Liszkowski et al., 2012, p. 699, traduction libre). L'acte de pointer agit donc comme une forme de connaissance biologique primaire en mesure de favoriser l'assimilation de connaissances biologiques secondaires (Hu et al., 2015).

Par ailleurs, l'utilisation des doigts est associée depuis fort longtemps à un contexte de dénombrement numérique (Gracia-Bafalluy et Noël, 2008). En effet, dans le cadre du développement cognitif d'un enfant, les doigts permettent de représenter les numéros avant même leurs représentations symboliques, c'est-à-dire les noms des chiffres (un, deux, trois, ...) ou écriture arabe (1,2,3, ...) (Fuson, 1988; Rusconi, Walsh et Butterworth, 2005). De là, si

un enfant peut se représenter un nombre sur ses doigts sans pouvoir associer ce nombre à une quantité représentée différemment, on considérera que l'enfant n'aura pas assimilé la notion de quantités (Brissiaud, 2011). De plus, l'usage des doigts pour dénombrer aide l'apprenant lorsque celui-ci récite une série de nombres (Sato et Lalain, 2008). En effet, l'usage des doigts pour dénombrer permet de retenir des éléments dans un contexte de calcul mental (Geary, 2005) en allégeant la charge de mémoire de travail (Alibali et DiRusso, 1999), augmentant de ce fait l'exactitude de la réponse (Geary, 2005; Gracia-Bafalluy et Noël, 2008). Il y a donc un étroit lien entre l'usage de ses doigts, la compréhension d'un concept et la réussite d'une tâche.

La difficulté de la tâche devrait avoir un impact sur le lien entre la gestuelle et la charge cognitive. Par exemple, pour une tâche relativement facile, l'utilisation ou non de la gestuelle devrait avoir un impact moins grand que pour une tâche plus difficile, dans laquelle la gestuelle permet de libérer des ressources cognitives. Ainsi, nous suggérons que la gestuelle a un effet modérateur sur la relation entre la difficulté de la tâche et la charge cognitive (H2).

Hypothèse 2 : Dans un contexte d'apprentissage des mathématiques sur tablette numérique, l'influence de la difficulté de la tâche sur la charge cognitive moyenne durant la tâche est réduite pour les utilisateurs pointant avec les doigts (H2a) ou comptant sur leurs doigts (H2b).

L'apprenant utilisant ses doigts pour pointer ou dénombrer lors de la résolution d'un problème, que celui-ci soit facile ou difficile, devrait voir des pics de charge cognitive moins élevés durant la tâche. Ainsi, en libération des ressources cognitives, la gestuelle diminue la variation de la charge cognitive durant la tâche (H3).

Hypothèse 3 : Dans un contexte d'apprentissage des mathématiques sur tablette numérique, le comportement de pointer (H3a) et dénombrer (H3b) avec les doigts diminue la variation de charge cognitive durant la tâche.

### 3. Méthodologie

#### 3.1 Design expérimental, stimuli et procédure

Afin de tester ces hypothèses, une expérience en laboratoire a été effectuée auprès d'enfants de 7 à 9 ans (2<sup>e</sup> cycle du primaire au Québec). Ce groupe d'âge a été ciblé parce que les habiletés de calcul mental sur des additions et des soustractions y sont introduites aux élèves à l'école (Gouvernement du Québec, 2001). Devant une nouvelle habileté à acquérir, ce groupe d'élèves est susceptible de présenter une variance plus importante dans la charge cognitive mesurée ou dans la gestuelle observée. Le projet a reçu l'approbation du comité d'éthique de l'institution du premier auteur.

Un design expérimental intra-sujet à un facteur a été utilisé. Ainsi, nous avons manipulé le niveau de difficulté des questions. Lors de l'expérimentation, les participants



devaient répondre à cinq blocs de six questions mathématiques. Chaque bloc de questions était constitué de trois questions faciles et de trois questions difficiles. Étaient jugées faciles les questions affichant trois choix de réponse et présentant une tâche de dénombrement ou deux éléments numériques à traiter dans le problème (figure 1,

questions du haut). Les questions jugées plus difficiles présentaient quatre choix de réponse à l'élève, ou trois choix de réponse, et trois éléments numériques à traiter pour résoudre le problème posé (figure 1, questions du bas). L'ordre de présentation des blocs a été randomisé pour chacun des participants.

**Easy Questions (Top):**

Use the graph to solve the problem.

**How Our Jackets Are Fastened**

Fasteners	0	1	2	3	4	5
zippers						
buttons						

How many more jackets have than ?

A 4    B 2    C 3

Aisha picks 60 blueberries to make a pie. Then she picks 14 more to eat.

How many blueberries does Aisha pick?

A 60 berries  
B 46 berries  
C 74 berries

**Difficult Questions (Bottom):**

Beth sees 5 red birds. She sees 2 yellow birds. She sees 5 blue birds.

How many birds does Beth see in all?

A 12  
B 7  
C 10

Which is the sum of the rewritten addition problem?

$$\begin{array}{r} 28 \\ + 59 \\ \hline \end{array}$$

A 77  
B 87  
C 31  
D 97

**Figure 1.** Exemples de questions faciles (haut) et difficiles (bas) sur l'interface HMH Player (Houghton Mifflin Harcourt, Boston, USA)

### 3.2 Échantillon

Étant donné l'usage d'un oculomètre lors de l'expérience, les enfants ne devaient pas porter de verres correcteurs pour la vue (et ne devaient pas avoir eu de correction laser de la vue), ne devaient pas être astigmatas, ne devaient pas souffrir d'épilepsie et ne devaient présenter aucun trouble psychologique ou neurologique diagnostiqué préalablement. Ainsi, 23 enfants anglophones (ou bilingues français-anglais) ont été recrutés. Les participants, accompagnés d'un parent, ont reçu une compensation de 50\$ pour leur participation qui a duré en moyenne 90 minutes.

Comme toute étude utilisant des instruments de mesure physiologiques, les données de quelques participants (5) n'ont pu être incluses dans les analyses. En effet, les données oculométriques de trois participants étaient inexploitable en raison d'une calibration impossible des mouvements des yeux. Quant aux deux autres participants,

un problème technique d'enregistrement vidéo nous a empêchés de repérer les mouvements des mains des sujets. Pour les 18 participants restants, leur moyenne d'âge était de 7,6 ans (tous âgés de 7 à 9 ans) et 60 % d'entre eux étaient des garçons. À noter que 85 % des enfants étaient droitiers parmi les 13 ayant déclaré leur dominance manuelle. 79 % des parents interrogés ont déclaré que leur enfant avait déjà utilisé une tablette numérique pour faire ses devoirs.

### 3.3 Instrumentation et mesures

Wierwille et Eggemeier (1993) répertorient trois méthodes de mesure de la charge cognitive : subjectives (p. ex. au moyen de questionnaires auto-administrés), physiologiques et axées la performance. Dans cette étude, nous avons utilisé une méthode physiologique afin d'inférer la charge cognitive, soit l'utilisation d'un oculomètre (*Tobii x60*).

L'oculométrie permet à la fois d'enregistrer les mouvements oculaires et le diamètre de la pupille (Baccino, 2002). La dilatation de la pupille nous révèle des informations à propos de la demande en mémoire de travail induite par une tâche spécifique (Klingner, Tversky et Hanrahan, 2011; Van Gerven et al., 2004). En effet, dès les années 1960, Kahneman et Beatty (1966) suggèrent que la dilatation de la pupille était associée à la charge cognitive. Plus récemment, Laeng, Sirois et Gredebäck (2012) mentionnent que la recherche en neuroscience démontre clairement une corrélation entre la dilatation de la pupille et l'activité cérébrale.

Le diamètre de la pupille du participant a été observé 60 fois par seconde et ce, pour chacune des 30 questions auxquelles il devait répondre (c.-à-d. cinq blocs de six questions). Il est à noter que la luminance de la salle expérimentale était contrôlée afin de ne pas biaiser les

mesures de dilatation de la pupille. En ce qui a trait à la gestuelle, l'observation du participant durant la tâche a permis de codifier le fait de dénombrer (usage des doigts) et de pointer (index) l'interface lors de la résolution des questions. À cet effet, le chercheur était positionné près de l'enfant afin d'observer sa gestuelle. Finalement, la performance de l'apprenant a été répertoriée après chaque question. Celui-ci pouvait donc obtenir une bonne réponse ou une mauvaise réponse. Le tableau 1 présente les différentes mesures utilisées.

Certaines mesures ne suivaient pas une distribution normale, il a donc été nécessaire de transformer ces variables afin de les normaliser (Park, 2008). Ainsi, les logarithmes népériens de l'écart-type du diamètre de la pupille (multiplié par 10000) et de la variable « pointer » ont été utilisés pour tester nos hypothèses.

**Tableau 1.** Variables mesurées

Variables mesurées	Mesures
Comportement de pointer	Observation du fait de pointer (ou non) pour répondre à la question (0 ou 1)
Comportement de dénombrer	Observation du fait de dénombrer (ou non) pour répondre à la question (0 ou 1)
Charge cognitive	Diamètre moyen de la pupille pour chaque question
Variation de la charge cognitive	Écart-type du diamètre de la pupille pour chaque question

**Tableau 2.** Statistiques descriptives

Statistiques/ Variable	Charge cognitive		Variation de la charge cognitive		Pointer		Dénombrer	
	Facile	Difficile	Facile	Difficile	Facile	Difficile	Facile	Difficile
Type de question								
Moyenne	4.02	4.14	0.12	0.12	0.05	0.00	0.22	0.30
Écart-type	0.55	0.58	0.11	0.07	0.23	0.00	0.42	0.46
Minimum	2.79	2.89	0.01	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
Maximum	5.46	5.47	1.05	0.33	1.00	0.00	1.00	1.00
Moyenne	4.05		0.12		0.04		0.24	
Écart-type	0.56		0.10		0.20		0.43	
Minimum	2.79		0.01		0.00		0.00	
Maximum	5.47		1.05		1.00		1.00	
Nombre d'observations	276		266		171		171	

#### 4. Analyses

##### 4.1 Statistiques descriptives

Les statistiques descriptives présentées au tableau 2 suggèrent une différence de charge cognitive entre les questions faciles et difficiles, ainsi que des comportements gestuels (pointer et dénombrer) différents selon le niveau de difficulté des questions. Les résultats montrent que la variable binaire « pointer » a une moyenne de 0.04; ceci signifie que nos participants ont en moyenne pointé dans 4 % des cas lorsqu'ils répondaient à une question. Pour ce qui est de « dénombrer », les participants ont utilisé leurs doigts pour dénombrer durant la tâche dans 23.98 % des cas. Quant à la performance, les participants ont obtenu 81 % de bonnes réponses aux questions.

##### 4.2 Effet de la difficulté de la question sur la charge cognitive (H1)

Afin de tester l'effet de la difficulté sur la charge cognitive, une régression linéaire a été utilisée (tableau 3). Tant dans le modèle 1 (variable indépendante : niveau de difficulté; variable dépendante : charge cognitive moyenne) que dans le modèle 2 (variables indépendantes : niveau de difficulté, pointer et dénombrer; variable dépendante : charge cognitive moyenne), les résultats confirment que le niveau de difficulté a un impact positif sur la charge cognitive moyenne (Modèle 1 :  $B=0.11$ ,  $p=0.022$ ; Modèle 2 :  $B=0.11$ ,  $p=0.014$ ), supportant H1.

**Tableau 3.** Effet de la difficulté d'une tâche sur la charge cognitive moyenne

	Modèle 1 <sup>a</sup>		Modèle 2 <sup>b</sup>	
	Coefficient	P> t	Coefficient	P> t
Difficulté	0.11	0.022	0.11	0.014
Pointer			-0.13	0.164
Dénombrer			-0.09	0.293
Constante	4.06	0.000	4.10	0.000

<sup>a</sup>  $n=169$ ;  $F(1, 9)=5.42$ ;  $\text{Prob} > F=0.0448$ ;  $R\text{-squared}=0.0118$ ;  $\text{Root MSE}=0.43418$

<sup>b</sup>  $n=169$ ;  $F(3, 9)=2.31$ ;  $\text{Prob} > F=0.1454$ ;  $R\text{-squared}=0.0232$ ;  $\text{Root MSE}=0.43427$

#### 4.3 Effets modérateurs du pointage et du dénombrement (H2)

Une série de régressions linéaires a été effectuée afin de tester l'effet modérateur de pointer (H2a) ou dénombrer (H2b) sur la force de la relation entre la difficulté et la charge cognitive moyenne durant la tâche. Pour les régressions, quatre groupes de participants furent comparés pour les comportements de pointage (c.-à-d. questions faciles avec pointage, questions faciles sans pointage, questions difficiles avec pointage, questions difficiles sans pointage; H2a) et quatre autres groupes au niveau du dénombrement (H2b). Les résultats des régressions comparant ces groupes au niveau de la charge cognitive ne montrent aucune relation significative ( $p > 0.05$ ). Ainsi, les résultats suggèrent que le fait de pointer ou dénombrer n'affecte pas la relation entre la difficulté et la charge cognitive.

#### 4.4 Impact de la gestuelle sur la variation de la charge cognitive (H3)

Afin de tester la troisième hypothèse, une série de régressions linéaires a été effectuée. Les résultats présentés dans le tableau 4 montrent que le fait de pointer et celui de dénombrer réduisent la variation de charge cognitive des participants. En effet, dans le modèle 3 (variable indépendante : niveau de difficulté, pointer et dénombrer; variable dépendante : variation de la charge cognitive), il existe une relation négative et significative entre pointer et la variation de la charge cognitive ( $B = -0.07$ ,  $p = 0.013$ ), supportant H3a. De plus, le fait de dénombrer a également un effet significatif et négatif sur la variation de la charge cognitive ( $B = -0.04$ ,  $p = 0.040$ ), supportant H3b.

**Tableau 4.** Effets de l'action de pointer et de l'action de dénombrer sur la variation de la charge cognitive

	Modèle 3 <sup>a</sup>	
	Coefficient	P> t
Difficulté	0.01	0.466
Pointer	-0.07	0.013
Dénombrer	-0.04	0.040
Constante	0.14	0.000

<sup>a</sup>  $n=165$ ;  $F(3, 9)=3.57$ ; Prob > F=0.0600; R-squared=0.0389; Root MSE=0.11223

## 5. Discussion et conclusion

Nos résultats suggèrent l'existence d'une relation positive entre le niveau de difficulté d'une question et la charge cognitive de l'apprenant (H1). Ceci corrobore ceux obtenus par Paas et al. (2003) postulant que la difficulté a un effet positif sur la charge cognitive de l'apprenant. Quant à l'effet modérateur de la gestuelle sur la relation entre la difficulté et la charge cognitive moyenne, nos résultats ne suggèrent

pas l'existence d'effet de la gestuelle à ce niveau (H2). Ce résultat peut paraître surprenant dans la mesure où l'on s'attendait à ce qu'une diminution de la charge cognitive intrinsèque ainsi qu'une augmentation de la capacité mémorielle de l'apprenant, liées à l'usage de ses mains dans un contexte d'apprentissage, viennent modérer à la baisse l'effet de difficulté de la tâche à accomplir sur la charge cognitive (Goldin-Meadow et al., 2001). Des efforts de réplication devraient être faits afin de tester la validité de ce résultat inattendu.

Enfin, les résultats mettent en évidence un impact significatif de la gestuelle (mouvement de pointer et dénombrer) sur la variation de la charge cognitive d'un apprenant (H3). En effet, nos résultats suggèrent qu'un enfant pointant du doigt ou comptant sur ses doigts verra sa charge cognitive se stabiliser (moins de variations) lors de la résolution d'un problème mathématique dans un contexte d'apprentissage en ligne. Ainsi, en libérant des ressources cognitives, on suggère que la gestuelle diminue effectivement la variation de la charge cognitive du sujet durant la tâche.

#### 5.1 Contributions théoriques

Notre étude vient enrichir la littérature liée à l'interaction enfant-machine, en évaluant et testant la dimension cognitive et comportementale de l'apprenant. Dans un premier temps, nos résultats corroborent ceux avancés par Paas et al. (2003) postulant que la difficulté a un effet positif sur la charge cognitive.

Dans un second temps, l'utilisation de deux variables opérationnalisant la dimension cognitive de l'enfant (moyenne et écart-type pupillaires), ainsi que la riche codification des mouvements de la main confèrent à nos résultats une singularité certaine. Nos résultats contribuent à la littérature en démontrant que les liens sont complexes entre difficulté, charge cognitive et gestuelle en contexte d'apprentissage des mathématiques sur tablette numérique. Ainsi, les gestes de pointer et de dénombrer ne modèrent pas la relation entre la difficulté et la charge cognitive (H2), mais ont plutôt un effet direct sur la variation de la charge cognitive (H3). L'enrichissement des mesures liées à la charge cognitive en contexte d'apprentissage contribue ainsi à une compréhension plus fine des relations entre ces trois construits. L'étude menée par Hu et al. (2015) pourrait, à titre d'exemple, être reconduite en utilisant une méthodologie similaire à la nôtre, permettant de spécifier de manière quantifiée les effets des variables considérées sur la charge cognitive.

#### 5.2 Implications le développement d'applications éducatives

En termes d'implications pour le développement d'applications éducatives, elles sont à trois niveaux. Premièrement, les résultats obtenus mettent en lumière la pertinence de la gestuelle comme outil d'évaluation de la charge cognitive. Les questionnaires de produits et concepteurs d'applications pédagogiques pour enfants ont



tout intérêt à valider leurs applications notamment à l'aide d'indicateurs liés à la charge cognitive générée durant l'utilisation de leur produit. Ces professionnels sont à même d'influer sur la charge cognitive induite par le produit en offrant aux utilisateurs des activités d'une difficulté alignée sur leur niveau de développement, et ce, dans une interface ergonomique, facile d'utilisation (Clark et Mayer, 2016). Évidemment, l'apprentissage et la résolution d'activités d'apprentissage impliquent des défis et des difficultés, donc des moments où la charge cognitive induite est élevée. Cependant, l'observation de la gestuelle des utilisateurs, notamment des enfants, permettra d'évaluer où sont les difficultés rencontrées et si, globalement, une application est adaptée.

Deuxièmement, les résultats suggèrent que les gestes de pointer et de dénombrer diminuent la variation de charge cognitive. Ainsi, il serait intéressant d'introduire une telle gestuelle dans les tutoriels des applications (p. ex. des vidéos expliquant l'énoncé ou présentant la solution aux exercices à l'aide de gestes) afin que les apprenants puissent modéliser les concepts autrement que de manière visuelle (textuelle) ou auditive ou simplement adopter ces gestes par imitation suite à l'utilisation du tutoriel. L'intégration de la gestuelle dans les tutoriels favoriserait l'expérience d'apprentissage, et pourrait, a fortiori, avoir un impact sur un grand nombre d'utilisateurs. Les tutoriels (ou toute autre aide disponible pour l'apprenant : lecture sonore de la question, utilisation de codes de couleurs, vidéo, etc.) sont techniquement vecteurs de diminution de la charge cognitive du jeune utilisateur. Il y aurait donc une opportunité de les améliorer en y introduisant la gestuelle. À ce sujet, Shipman et al. (2005) soulignent que les tutoriels sont généralement jugés comme étant trop longs et répétitifs par les étudiants (la présentation de l'information étant trop textuelle, faisant en sorte que la progression à l'aide du tutoriel est ennuyante ou ardue par moments).

Finalement, le lien entre la gestuelle et la charge cognitive et les possibilités récentes de détection des gestes par la technologie devraient permettre aux développeurs d'applications éducatives d'intégrer la reconnaissance de la gestuelle au sein de leur application. Tel que mentionné, une dissonance entre la gestuelle d'un enfant et son explication (à voix haute) révèle un état transitionnel d'apprentissage qui laisse présager une bonne assimilation du concept (Goldin-Meadow, 2005). L'enfant est alors plus réceptif aux explications. Un tel système de suivi du comportement de l'enfant dans un contexte d'apprentissage numérique peut être mis en lien avec des idées nouvelles appartenant aux IHM (interactions humain-machine) : les concepts de « *natural user interfaces* », « *motion gaming* » ou « *spatial tracking* » (p. ex. Liu, 2010). Grâce aux initiatives de l'industrie du jeu vidéo, il est désormais possible de suivre les mouvements des utilisateurs sans que ceux-ci ne touchent l'interface numérique, par exemple la Kinect pour la console Xbox, PlayStation Move ou Wii Remote. Plus récemment, et plus adapté à notre contexte d'étude, le « *leap motion* » (leapmotion.com) constitue la nouvelle

génération de capteurs de mouvements 3D. Ce logiciel permet de reconnaître la forme de la main et de distinguer le mouvement de chacun des dix doigts au moyen d'un boîtier de taille réduite, peu intrusif, branché à la tablette. Les concepteurs et professionnels des technologies de l'information pourraient alors développer un produit se servant de cette technologie pour trianguler données comportementales, sonores (explications à voix haute) et résolution d'exercices, afin de développer un nouveau courant de recherches futures : celui de l'apprentissage à l'aide du mouvement, le « *motion learning* ».

### 5.3 Limites de la recherche et avenues futures

Notre étude comporte certaines limites. En effet, même si notre échantillon comporte 18 participants et correspond, de ce fait, au nombre moyen de participants pour une étude en neurosciences (Lieberman, Berkman et Wager, 2009), celui-ci induit cependant un risque au niveau de la validité externe. De futures études permettront de valider la représentativité des résultats.

De plus, même si notre codification de la gestuelle se base sur des études antérieures traitant de gestes spécifiques (Hu et al., 2015; Liszkowski et al., 2012), l'élaboration d'un guide de codification des mouvements de l'enfant, plus spécifiquement dans un contexte d'apprentissage numérique, pourrait être pertinente pour les recherches futures. En effet, la définition des gestes et de certaines variables (p. ex. interruption, fin du décompte) peut être ambiguë. Ce propos est appuyé par Reynolds et Reeve (2001) qui mentionnent dans leur étude portant sur l'apprentissage des mathématiques que la description et la classification granulaires des gestes permettraient une meilleure compréhension des relations entre la parole et la gestuelle.

Enfin, certains concepts pourraient être intégrés à notre modèle, et constitueraient d'intéressantes pistes de recherche. À titre d'exemple, on pourrait s'attarder à la rétroaction reçue instantanément après chaque réponse et à son impact sur la motivation, sur la performance et sur la charge cognitive de l'apprenant. En effet, l'étude conduite par Wallace et Baumeister (2002) traite de l'effet d'une rétroaction positive vs. négative sur le contrôle de soi (« *self-control* »). Cette rétroaction négative influence également l'ego du répondant. Le phénomène d'« *ego depletion* » est notamment abordé par Baumeister et al. (1998), Inzlicht et Schmeichel (2012) et Schmeichel et al. (2015) et est étroitement lié à la performance de l'enfant, puisqu'une diminution du contrôle/estime de soi dégrade la performance future de l'apprenant. Ces concepts gravitent autour de nos variables et pourraient enrichir notre modèle.

## Références

- Alibali, M. W. et DiRusso, A. A. (1999). The function of gesture in learning to count: More than keeping track. *Cognitive development*, 14(1), 37-56. [https://doi.org/10.1016/s0885-2014\(99\)80017-3](https://doi.org/10.1016/s0885-2014(99)80017-3)
- Alibali, M. W. et Goldin-Meadow, S. (1993). Gesture-speech mismatch and mechanisms of learning: What the hands reveal about a child's state of mind. *Cognitive Psychology*, 25(4), 468-523. <https://doi.org/10.1006/cogp.1993.1012>
- April, J. (2010). L'importance du corps dans le développement de l'enfant. *Revue préscolaire*, 48(2), 21-23.
- Baccino, T. (2002). Oculométrie cognitive. Dans G. Tiberghien (dir.), *Dictionnaire des sciences cognitives* (p. 202-203). Paris: Armand Colin.
- Bartholomew, J. B. et Jowers, E. M. (2011). Physically active academic lessons in elementary children. *Preventive Medicine*, 52, S51-S54. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2011.01.017>
- Baumeister, R. F., Bratslavsky, E., Muraven, M. et Tice, D. M. (1998). Ego depletion: Is the active self a limited resource? *Journal of Personality and Social Psychology*, 74(5), 1252-1265. <http://psycnet.apa.org/doi/10.1037/0022-3514.74.5.1252>
- Berteletti, I. et Booth, J. R. (2015). Perceiving fingers in single-digit arithmetic problems. *Frontiers in psychology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00226>
- Bouchard, C. et Fréchette, N. (2011). *Le développement global de l'enfant de 6 à 12 ans en contextes éducatifs*. Québec : Presses de l'Université du Québec.
- Brissiaud, R. (2011). *Comment les enfants apprennent à calculer*. Paris : Retz.
- Broaders, S. C., Cook, S. W., Mitchell, Z. et Goldin-Meadow, S. (2007). Making children gesture brings out implicit knowledge and leads to learning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136(4), 539-550. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.136.4.539>
- Bruce, C. D. et Ross, J. (2009). Conditions for effective use of interactive on-line learning objects: The case of a fractions computer-based learning sequence. *Electronic Journal of Mathematics and Technology*, 3(1), 12-29.
- Brunken, R., Plass, J. L. et Leutner, D. (2003). Direct measurement of cognitive load in multimedia learning. *Educational Psychologist*, 38(1), 53-61. [https://doi.org/10.1207/s15326985ep3801\\_7](https://doi.org/10.1207/s15326985ep3801_7)
- Cheng, T.-S., Lu, Y.-C. et Yang, C.-S. (2015). Using the multi-display teaching system to lower cognitive load. *Journal of Educational Technology & Society*, 18(4), 128-140. <http://www.jstor.org/stable/jeductechsoci.18.4.128>
- Clark, R. C. et Mayer, R. E. (dir.). (2016). *E-learning and the science of instruction: Proven guidelines for consumers and designers of multimedia learning* (4<sup>e</sup> édition). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119239086>
- Cooper, G. et Sweller, J. (1987). Effects of schema acquisition and rule automation on mathematical problem-solving transfer. *Journal of Educational Psychology*, 79(4), 347-362. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.79.4.347>
- Cosman, J. D. et Vecera, S. P. (2010). Attention affects visual perceptual processing near the hand. *Psychological Science*, 21(9), 1254-1258. <https://doi.org/10.1177/0956797610380697>
- Cox, M. J. (2012). Formal to informal learning with IT: research challenges and issues for e-learning. *Journal of Computer Assisted Learning*, 29(1), 85-105. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.2012.00483.x>
- Cuendet, S., Dehler-Zufferey, J., Ortoleva, G. et Dillenbourg, P. (2015). An integrated way of using a tangible user interface in a classroom. *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, 10(2), 183-208. <https://doi.org/10.1007/s11412-015-9213-3>
- Donnelly, J. E. et Lambourne, K. (2011). Classroom-based physical activity, cognition, and academic achievement. *Preventive Medicine*, 52, S36-S42. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2011.01.021>
- Durkin, K., Boyle, J., Hunter, S. et Conti-Ramsden, G. (2013). Video games for children and adolescents with special educational needs. *Zeitschrift für Psychologie*, 221(2), 79-89. <https://doi.org/10.1027/2151-2604/a000138>
- Erickson, K. I., Hillman, C. H. et Kramer, A. F. (2015). Physical activity, brain, and cognition. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 4, 27-32. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2015.01.005>
- Fayol, M., Largy, P. et Lemaire, P. (1994). Cognitive overload and orthographic errors: When cognitive overload enhances subject-verb agreement errors. A study in French written language. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 47(2), 437-464. <https://doi.org/10.1080/14640749408401119>
- Fedewa, A. L. et Ahn, S. (2011). The effects of physical activity and physical fitness on children's achievement and cognitive outcomes: a meta-analysis. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 82(3), 521-535. <https://doi.org/10.5641/027013611x13275191444107>
- Fischer, M. H. et Hoellen, N. (2004). Space-and object-based attention depend on motor intention. *The Journal of General Psychology*, 131(4), 365.
- Fuson, K. (1988). *Counting and concepts of number*. New York, NY : Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3754-9>

- Geary, D. (2005). Les troubles d'apprentissage en arithmétique : rôle de la mémoire de travail et des connaissances conceptuelles. Dans M.-P. Noël (dir.), *La dyscalculie : trouble du développement numérique de l'enfant* (p. 169-191). Marseille: Solal.
- Ghosh, V. E. et Gilboa, A. (2014). What is a memory schema? A historical perspective on current neuroscience literature. *Neuropsychologia*, 53, 104-114. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.11.010>
- Glenberg, A. M., Goldberg, A. B. et Zhu, X. (2011). Improving early reading comprehension using embodied CAI. *Instructional Science*, 39(1), 27-39. <https://doi.org/10.1007/s11251-009-9096-7>
- Glenberg, A. M., Gutierrez, T., Levin, J. R., Japuntich, S. et Kaschak, M. P. (2004). Activity and imagined activity can enhance young children's reading comprehension. *Journal of Educational Psychology*, 96(3), 424-436. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.96.3.424>
- Glenberg, A. M. et Robertson, D. A. (1999). Indexical understanding of instructions. *Discourse Processes*, 28(1), 1-26. <https://doi.org/10.1080/01638539909545067>
- Goldin-Meadow, S. (2005). *Hearing gesture: How our hands help us think*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Goldin-Meadow, S., Cook, S. W. et Mitchell, Z. A. (2009). Gesturing gives children new ideas about math. *Psychological Science*, 20(3), 267-272. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2009.02297.x>
- Goldin-Meadow, S., Nusbaum, H., Kelly, S. D. et Wagner, S. (2001). Explaining math: Gesturing lightens the load. *Psychological Science*, 12(6), 516-522. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00395>
- Gouvernement du Québec (2001). *Programme de formation de l'école québécoise (Enseignement primaire)*. Québec : Ministère de l'éducation du Québec.
- Gracia-Bafalluy, M. et Noël, M.-P. (2008). Does finger training increase young children's numerical performance? *Cortex*, 44(4), 368-375. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.020>
- Hu, F.-T., Ginns, P. et Bobis, J. (2015). Getting the point: Tracing worked examples enhances learning. *Learning and Instruction*, 35, 85-93. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2014.10.002>
- Huang, Y.-M., Liang, T.-H., Su, Y.-N. et Chen, N.-S. (2012). Empowering personalized learning with an interactive e-book learning system for elementary school students. *Educational Technology Research and Development*, 60(4), 703-722. <https://doi.org/10.1007/s11423-012-9237-6>
- Inzlicht, M. et Schmeichel, B. J. (2012). What is ego depletion? Toward a mechanistic revision of the resource model of self-control. *Perspectives on Psychological Science*, 7(5), 450-463. <https://doi.org/10.1177/1745691612454134>
- Kahneman, D. et Beatty, J. (1966). Pupil diameter and load on memory. *Science*, 154(3756), 1583-1585. <https://doi.org/10.1126/science.154.3756.1583>
- Kharitonova, M., Winter, W. et Sheridan, M. A. (2015). As working memory grows: A developmental account of neural bases of working memory capacity in 5-to 8-year old children and adults. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27(9), 1775-1788. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_00824](https://doi.org/10.1162/jocn_a_00824)
- Klingner, J., Tversky, B. et Hanrahan, P. (2011). Effects of visual and verbal presentation on cognitive load in vigilance, memory, and arithmetic tasks. *Psychophysiology*, 48(3), 323-332. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2010.01069.x>
- Laeng, B., Sirois, S. et Gredebäck, G. (2012). Pupillometry: A window to the preconscious? *Perspectives on Psychological Science*, 7(1), 18-27. <https://doi.org/10.1177/1745691611427305>
- Lafay, A., Thevenot, C., Castel, C. et Fayol, M. (2013). The role of fingers in number processing in young children. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00488>
- Lang, J. (2007). *The effect of presenting worked examples for problem solving in a computer game*. Thèse de doctorat inédite. University of Southern California, Los Angeles, USA. <https://search.proquest.com/docview/304808804>
- Lieberman, M. D., Berkman, E. T. et Wager, T. D. (2009). Correlations in social neuroscience aren't voodoo: Commentary on Vul et al. (2009). *Perspectives on Psychological Science*, 4(3), 299-307. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6924.2009.01128.x>
- Liszkowski, U., Brown, P., Callaghan, T., Takada, A. et de Vos, C. (2012). A prelinguistic gestural universal of human communication. *Cognitive Science*, 36(4), 698-713. <https://doi.org/10.1111/j.1551-6709.2011.01228.x>
- Liu, W. (2010). *Natural user interface-next mainstream product user interface*. Paper presented at the 2010 IEEE 11<sup>th</sup> International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design 1. <https://doi.org/10.1109/caidcd.2010.5681374>
- McNeill, D. (1992). *Hand and mind: What gestures reveal about thought*. Chicago, IL: University of Chicago Press.



- Moyer-Packenham, P. et Suh, J. (2012). Learning mathematics with technology: The influence of virtual manipulatives on different achievement groups. *Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching*, 31(1), 39-59.
- Novack, M. et Goldin-Meadow, S. (2015). Learning from gesture: How our hands change our minds. *Educational Psychology Review*, 27(3), 405-412. <https://doi.org/10.1007/s10648-015-9325-3>
- O'Hare, E. D., Lu, L. H., Houston, S. M., Bookheimer, S. Y. et Sowell, E. R. (2008). Neurodevelopmental changes in verbal working memory load-dependency: an fMRI investigation. *Neuroimage*, 42(4), 1678-1685. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.05.057>
- Paas, F., Renkl, A. et Sweller, J. (2003). Cognitive load theory and instructional design: Recent developments. *Educational Psychologist*, 38(1), 1-4. [https://doi.org/10.1207/s15326985ep3801\\_1](https://doi.org/10.1207/s15326985ep3801_1)
- Paas, F. et Van Gog, T. (2006). Optimising worked example instruction: Different ways to increase germane cognitive load. *Learning and Instruction*, 16(2), 87-91. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.02.004>
- Park, H. M. (2008). *Univariate analysis and normality test using SAS, Stata, and SPSS*. Rapport technique. The University Information Technology Services (UITS) Center for Statistical and Mathematical Computing, Indiana University. <http://hdl.handle.net/2022/19742>
- Ping, R. et Goldin-Meadow, S. (2010). Gesturing saves cognitive resources when talking about nonpresent objects. *Cognitive Science*, 34(4), 602-619. <https://doi.org/10.1111/j.1551-6709.2010.01102.x>
- Ping, R. et Goldin-Meadow, S. (2008). Hands in the air: using ungrounded iconic gestures to teach children conservation of quantity. *Developmental Psychology*, 44(5), 1277-1287. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.44.5.1277>
- Pollock, E., Chandler, P. et Sweller, J. (2002). Assimilating complex information. *Learning and Instruction*, 12(1), 61-86. [https://doi.org/10.1016/s0959-4752\(01\)00016-0](https://doi.org/10.1016/s0959-4752(01)00016-0)
- Price, S., Jewitt, C. et Crescenzi, L. (2015). The role of iPads in pre-school children's mark making development. *Computers & Education*, 87, 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.04.003>
- Read, J. et Markopoulos, P. (2013). Child-computer interaction. *International Journal of Child-Computer Interaction*, 1(1), 2-6. <https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2012.09.001>
- Reed, C. L., Grubb, J. D. et Steele, C. (2006). Hands up: Attentional prioritization of space near the hand. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32(1), 166-177. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.32.1.166>
- Reynolds, F. J. et Reeve, R. A. (2001). Gesture in collaborative mathematics problem-solving. *The Journal of Mathematical Behavior*, 20(4), 447-460. [https://doi.org/10.1016/s0732-3123\(02\)00091-3](https://doi.org/10.1016/s0732-3123(02)00091-3)
- Rusconi, E., Walsh, V. et Butterworth, B. (2005). Dexterity with numbers: rTMS over left angular gyrus disrupts finger gnosis and number processing. *Neuropsychologia*, 43(11), 1609-1624. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.01.009>
- Sato, M. et Lalain, M. (2008). On the relationship between handedness and hand-digit mapping in finger counting. *Cortex*, 44(4), 393-399. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.005>
- Schmeichel, B. J., Caskey, R. et Hicks, J. A. (2015). Rational versus experiential processing of negative feedback reduces defensiveness but induces ego depletion. *Self and Identity*, 14(1), 75-89. <https://doi.org/10.1080/15298868.2014.952772>
- Shipman, J. P., Barbara Watstein, S., Bury, S. et Oud, J. (2005). Usability testing of an online information literacy tutorial. *Reference Services Review*, 33(1), 54-65. <https://doi.org/10.1108/00907320510581388>
- Shoval, E. (2011). Using mindful movement in cooperative learning while learning about angles. *Instructional Science*, 39(4), 453-466. <https://doi.org/10.1007/s11251-010-9137-2>
- Sung, H.-Y., Hwang, G.-J. et Yen, Y.-F. (2015). Development of a contextual decision-making game for improving students' learning performance in a health education course. *Computers & Education*, 82, 179-190. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2014.11.012>
- Sweller, J. (2010). Element interactivity and intrinsic, extraneous, and germane cognitive load. *Educational Psychology Review*, 22(2), 123-138. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9128-5>
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257-285. [https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202\\_4](https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4)
- Sweller, J., Ayres, P. et Kalyuga, S. (2011). Interacting with the external environment: The narrow limits of change principle and the environmental organising and linking principle. Dans *Cognitive load theory. Explorations in the learning sciences, instructional systems and performance technologies* (Vol. 1) (p. 39-53). New York, NY: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4_4)
- Tomporowski, P., Davis, C., Miller, P. et Naglieri, J. (2008). Exercise and children's intelligence, cognition, and academic achievement. *Educational Psychology Review*, 20(2), 111-131. <https://doi.org/10.1007/s10648-007-9057-0>

- Van Gerven, P. W., Paas, F., Van Merriënboer, J. J. et Schmidt, H. G. (2004). Memory load and the cognitive pupillary response in aging. *Psychophysiology*, 41(2), 167-174. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2003.00148.x>
- Wagner, S. M., Nusbaum, H. et Goldin-Meadow, S. (2004). Probing the mental representation of gesture: Is handwaving spatial? *Journal of Memory and Language*, 50(4), 395-407. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2004.01.002>
- Wallace, H. M. et Baumeister, R. F. (2002). The effects of success versus failure feedback on further self-control. *Self and Identity*, 1(1), 35-41. <https://doi.org/10.1080/152988602317232786>
- Wierwille, W. W. et Eggemeier, F. T. (1993). Recommendations for mental workload measurement in a test and evaluation environment. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 35(2), 263-281. <https://doi.org/10.1177/001872089303500205>
- Xie, B. et Salvendy, G. (2000). Prediction of mental workload in single and multiple tasks environments. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 4(3), 213-242. [https://doi.org/10.1207/s15327566ijce0403\\_3](https://doi.org/10.1207/s15327566ijce0403_3)