NUMÉRO THÉMATIQUE

L'utilisation de mesures cérébrales ou psychophysiologiques pour mieux comprendre, en direct, l'apprentissage, le raisonnement ou la performance des apprenants

SPECIAL ISSUE

Using Brain or Psychophysiological Measurements to Better Understand Learning, Reasoning or Performance, in Real-time

Guest Editor / Directeur invité

PATRICK CHARLAND, Ph.D.

Université du Québec à Montréal

To cite this issue: Charland, P. (Ed.). (2018). Using Brain or Psychophysiological Measurements to Better Understand Learning, Reasoning or Performance, in Real-time [Special Issue]. *Neuroeducation*, 5(1).

Pour citer ce numéro : Charland, P. (dir.). (2018). L'utilisation de mesures cérébrales ou psychophysiologiques pour mieux comprendre, en direct, l'apprentissage, le raisonnement ou la performance des apprenants [Numéro thématique]. *Neuroéducation*, 5(1).

Issue DOI / DOI du numéro: <https://doi.org/10.24046/neuroed.20180501>

Available online on March 1st, 2018 / Disponible en ligne le 1^{er} mars 2018

Neuroeducation, 5(1)

ISSN: 1929-1833

All rights reserved / Tous droits réservés

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

INTRODUCTION

L'utilisation de données psychophysiologiques pour mieux comprendre l'apprentissage en temps réel : le fragile équilibre entre la validité des données et l'authenticité des contextes de collecte de données

Patrick Charland^{1*} et Jan-Sébastien Dion²

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

² Université de Sherbrooke, Faculté d'éducation, Département de pédagogie, Sherbrooke, Canada

*Correspondance avec l'auteur : charland.patrick@uqam.ca

Pour citer cet article: Charland, P. et Dion, J.-S. (2018). L'utilisation de données psychophysiologiques pour mieux comprendre l'apprentissage en temps réel : le fragile équilibre entre la validité des données et l'authenticité des contextes de collecte de données. *Neuroéducation*, 5(1), 1-3.

DOI: <https://doi.org/10.24046/neuroed.20180501.1>

Les chercheurs en neuroéducation, grâce à leur utilisation de l'imagerie cérébrale, de l'électroencéphalographie, de l'oculométrie et de la pupillométrie, entre autres méthodes, colligent des données psychophysiologiques en temps réel ou très près du temps réel, pour mieux comprendre des phénomènes liés à l'enseignement et à l'apprentissage. Leurs travaux et méthodologies pourraient répondre à un besoin en recherche transdisciplinaire puisque plusieurs chercheurs, en sciences de l'éducation et en psychologie cognitive entre autres, en appellent depuis quelques années déjà au développement et à l'application de telles méthodes de collecte de données en temps réel (p. ex. Boekaerts, 2017; Campbell, 2011; Campbell et Pagé, 2012; Gerjets, 2017; Mercier et Charland, 2013; Timms, DeVelle et Lay, 2016), pour enrichir et développer leurs modèles théoriques, en les combinant notamment à des données comportementales. Ces dites-méthodes permettent l'étude de processus liés, notamment, à la métacognition (p. ex. Schwartz, Scott et Holzberger, 2013), à l'autorégulation et à l'apprentissage autorégulé (p. ex. Dion, 2015; Effene, 2011); aux modalités d'apprentissage (Lee et al., 2006), à la pensée réflexive des apprenants pendant un apprentissage (Durall et al., 2017), ou encore à la variation de l'état cognitif et de la charge cognitive en contextes d'apprentissage (p. ex. Liu et al., 2017; Mills et al., 2017). De nombreux exemples d'application de ces méthodes en éducation existent et, plus récemment, les contextes d'e-learning, d'hypermédia et de technopédagogie semblent particulièrement fertiles (Chen, 2017; Chen et Wang, 2017; Chen et Wu, 2015; Conrad et Blumel, 2017; Wu, Tzeng et Huang, 2014), et cela se reflète sur le présent numéro.

Pour en savoir davantage sur les différents types d'application des données psychophysiologiques en éducation, le lecteur est invité à consulter également l'article d'Antonenko, van Gog et Paas (2014), le chapitre de Goswami (2010) et l'ouvrage dirigé par Masson et Borst (2017).

Cependant, l'utilisation de données psychophysiologiques en temps réel dans le champ de la neuroéducation est encore en développement et les travaux en ce sens, à mesure qu'ils émergent, ont intérêt à être connus et diffusés dans des revues et communautés scientifiques transdisciplinaires. Ce tout premier numéro thématique de la revue *Neuroéducation* vise donc à en regrouper quelques-uns et met de l'avant par le fait même deux défis interreliés, propres à ce jeune champ de recherche : (1) l'importance de la validité des données colligées en temps réel pour leur interprétation, et (2) le souci de se rapprocher tant que possible de contextes ou d'environnements éducatifs authentiques (p. ex. Mercier et al., 2012). Ces deux enjeux semblent s'inter-influencer dans la mesure où les efforts visant l'atteinte de l'un peuvent nuire à l'atteinte de l'autre, et vice-versa.

Ce numéro thématique comprend deux recherches expérimentales et deux articles à visée méthodologique, lesquels reflètent tous l'émergence de l'utilisation de données psychophysiologiques pour répondre à des problématiques éducatives, ainsi que le double enjeu susmentionné lié à des considérations de validité et d'authenticité des contextes.

L'article de Skelling-Desmeules (2018), en didactique des sciences, présente une recherche expérimentale dont l'objectif est de cerner l'impact de l'intérêt d'apprenants sur la performance à un jeu vidéo éducatif en sciences (*Mécanika*). Les dimensions cognitive et affective de l'intérêt situationnel ont été mesurées en temps réel au moyen d'électroencéphalogrammes et de la pupillométrie.

L'étude de Di Fabio et al. (2018) vise quant à elle à décrire l'impact de la gestuelle (les mouvements des mains) sur la charge cognitive de l'enfant, mesurée par oculométrie, dans un contexte de résolution de problèmes mathématiques sur tablette numérique.

Le premier article à visée méthodologique, celui de Lapierre (2018), se veut une preuve de concept résultant du développement d'une technique générant des marqueurs temporels dans une vidéo, en fonction de différents types de données psychophysiologiques d'un participant filmé, pour faciliter l'analyse des données et éventuellement l'interprétation, par exemple, de l'expression d'un état cognitif comme l'engagement, sur les plans comportemental, cognitif et émotif.

Finalement, Léger et al. (2018) proposent une série de recommandations méthodologiques pour optimiser l'équilibre entre des données oculométriques valides et fiables, et l'interaction la plus naturelle que possible de jeunes enfants avec une tablette, en contexte d'apprentissage. Ces recommandations sont issues de trois études au design similaire menées par les auteurs.

Références

- Antonenko P. D., van Gog T. et Paas F. (2014). Implications of neuroimaging for educational research. Dans J. Spector, M. Merrill, J. Elen et M. Bishop (dir.), *Handbook of Research on Educational Communications and Technology* (p. 51-63). New York, NY : Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3185-5_5
- Boekaerts, M. (2017). Cognitive load and self-regulation: Attempts to build a bridge. *Learning and Instruction*, 51, 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.07.001>
- Campbell, S. R. (2011). Educational neuroscience: Motivation, methodology, and implications. *Educational Philosophy and Theory*, 43(1), 7-16. <https://doi.org/10.1111/j.1469-5812.2010.00701.x>
- Campbell, S. R. et Pagé, P. (2012). La neuroscience éducationnelle : enrichir la recherche en éducation par l'ajout de méthodes psychophysiologiques pour mieux comprendre l'apprentissage. *Neuroéducation*, 1(1), 115-144. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20120101.115>
- Chen, C. H. (2017). Measuring the differences between traditional learning and game-based learning using electroencephalography (EEG) physiologically based methodology. *Journal of Interactive Learning Research*, 28(3), 221-233. <https://www.learnlib.org/p/174121/>

- Chen, C. M. et Wang, J. Y. (2017). Effects of online synchronous instruction with an attention monitoring and alarm mechanism on sustained attention and learning performance. *Interactive Learning Environments*, 1-17. <https://doi.org/10.1080/10494820.2017.1341938>
- Chen, C. M. et Wu, C. H. (2015). Effects of different video lecture types on sustained attention, emotion, cognitive load, and learning performance. *Computers & Education*, 80, 108-121. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2014.08.015>
- Conrad, C. D. et Bliemel, M. (2017). Psychophysiological measures of cognitive absorption and cognitive load in e-learning applications. Dans A. Pär, N. Levina et S. S. Kien (dir.), *Proceedings of the 36th International Conference on Information Systems 2016*. Dublin, Irlande: AIS.
- 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. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20180501.13>
- Dion, J.-S. (2015). Bases théoriques pour l'étude de l'autorégulation enseignante par électroencéphalographie: vers de nouvelles recherches en neuroéducation. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant* (A.N.A.E.), 27(134), 63-70.
- Durall, E., Leinonen, T., Gros, B. et Rodriguez-Kaarto, T. (2017). Reflection in learning through a self-monitoring device: Design research on EEG self-monitoring during a study session. *Designs for Learning*, 9(1), 10-20. <http://doi.org/10.16993/dfl.75>
- Effeney, G. (2011). *The development of executive function and self-regulated learning in adolescent males*. Thèse de doctorat inédite, University of Queensland, Australie.
- Gerjets, P. (2017). Learning and problem-solving with hypermedia in the twenty-first century: From hypertext to multiple web sources and multimodal adaptivity. Dans S. Schwan et U. Cress (dir.), *The Psychology of Digital Learning* (p. 61-88). Cham, Suisse: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49077-9_4
- Goswami, U. (2010). Neuroscience in education. Dans C. L. Cooper, J. Field, U. Goswami, R. Jenkins et B. J. Sahakian (dir.), *Mental Capital and Wellbeing* (p. 55-62). Oxford, Royaume-Uni: Wiley-Blackwell.
- Lapierre, H. G. (2018). Exploration automatisée de données vidéo à partir d'un fil de données psychophysiologiques: une preuve de concept en sciences de l'éducation. *Neuroéducation*, 5(1), 26-32. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20180501.26>
- Lee, L., Lee, M., Lee, H., Guioy, I., Hong, T. et Williams, W. (2006). Quantitative EEG as an identifier of learning modality. U.S. Patent Application No. 11/430,555.
- Léger, P.-M., Sénécal, S., Karpova, É., Briegne, D., Di Fabio, M.-L. et Georges, V. (2018). Setup guidelines for eye tracking in child and teenager research in the context of learning by interacting with a tablet. *Neuroéducation*, 5(1), 33-40. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20180501.33>
- Liu, X., Tan, P. N., Liu, L. et Simske, S. J. (2017). Automated classification of EEG signals for predicting students' cognitive state during learning. Dans *Proceedings of the International Conference on Web Intelligence* (p. 442-450). New York, NY: ACM. <https://doi.org/10.1145/3106426.3106453>
- Masson, S. et Borst, G. (dir.). (2017). *Méthodes de recherche en neuroéducation*. Québec : Presses de l'Université du Québec.
- Mercier, J. et Charland, P. (2013). An agenda for neuroeducation: relating psychophysiological and behavioral data across time scales of learning. *Neuroéducation*, 2(1), 71-86. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20130201.71>
- Mercier, J., Léger, P.-M., Girard, C. et Dion, J.-S. (2012). Bridging the gap between cognitive neuroscience and education: Psychophysiological and behavioral data collection in authentic contexts. *Neuroéducation*, 1(1), 5-28. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20120101.5>
- Mills, C., Fridman, I., Soussou, W., Waghray, D., Olney, A. M. et D'Mello, S. K. (2017). Put your thinking cap on: Detecting cognitive load using EEG during learning. Dans *Proceedings of the Seventh International Learning Analytics & Knowledge Conference* (p. 80-89). New York, NY: ACM. <https://doi.org/10.1145/3027385.3027431>
- Schwartz, N. H., Scott, B. M. et Holzberger, D. (2016). Metacognition: A closed-loop model of biased competition-evidence from neuroscience, cognition, and instructional research. Dans R. Azevedo et V. Aleven (dir.), *International Handbook of Metacognition and Learning Technologies* (p. 79-94). New York, NY: Springer Science+Business Media. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5546-3_6
- Skelling-Desmeules, Y. (2018). Impacts des dimensions cognitives et affectives de l'intérêt situationnel sur la performance à un jeu vidéo éducatif en science. *Neuroéducation*, 5(1), 7-12. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20180501.7>
- Timms, M., DeVelle, S. et Lay, D. (2016). Towards a model of how learners process feedback: A deeper look at learning. *Australian Journal of Education*, 60(2), 128-145. <https://doi.org/10.1177/0004944116652912>
- Wu, C.-H., Tzeng, Y.-L. et Huang, Y. M. (2014). Understanding the relationship between physiological signals and digital game-based learning outcome. *Journal of Computers in Education*, 1(1), 81-97. <https://doi.org/10.1007/s40692-014-0006-x>

INTRODUCTION

The use of psychophysiological data to better understand real-time learning: the fragile balance between the validity of data and the authenticity of data collection contexts

Patrick Charland^{1*} & Jan-Sébastien Dion²

¹ Université du Québec à Montréal, Faculty of Education Sciences, Department of Didactics, Montreal, Canada

² Université de Sherbrooke, Faculty of Education, Department of Pedagogy, Sherbrooke, Canada

*Author email address: charland.patrick@uqam.ca

To cite this article: Charland, P., & Dion, J.-S. (2018). The use of psychophysiological data to better understand real-time learning: the fragile balance between the validity of data and the authenticity of data collection contexts. *Neuroeducation*, 5(1), 4-6.

DOI: <https://doi.org/10.24046/neuroed.20180501.4>

Researchers in neuroeducation, through their use of brain imaging, electroencephalography, oculometry and pupillometry, among other techniques, collect psychophysiological data in real time or very close to real time, to better understand phenomena related to teaching and learning. Their work and methodologies could meet a transdisciplinary research need since many researchers, in education sciences and cognitive psychology among others, have been calling for some years now to the development and application of such real-time methods of data collection (e.g. Boekaerts, 2017; Campbell, 2011; Campbell & Pagé, 2012; Gerjets, 2017; Mercier & Charland, 2013; Timms, DeVelle, & Lay 2016), to enrich and develop theoretical models by combining them, notably, to behavioral data. These real-time data collection methods allow the study of processes related to metacognition (e.g. Schwartz, Scott, & Holzberger, 2013), self-regulation and self-regulated learning (e.g. Dion, 2015; Effene, 2011); learning modalities (Lee *et al.*, 2006), student reflective thinking during learning (Durall *et al.*, 2017), or cognitive state and cognitive load variations in a learning context (e.g. Liu *et al.*, 2017; Mills *et al.*, 2017). There are many application examples of these methods in education and, more recently, they seem to abound in the contexts of e-learning, hypermedia, and technology-enhanced learning (Chen, 2017; Chen & Wang, 2017; Chen & Wu, 2015; Conrad & Bliemel, 2017; Wu, Tzeng, & Huang, 2014), and this is reflected in this issue.

To find out more about the different types of applications of psychophysiological data in education, the reader is invited to consult Antonenko, van Gog, & Paas' (2014) article, Goswami's chapter (2010), and the book directed by Masson & Borst (2017).

However, the use of psychophysiological data in real time in the field of neuroeducation is still in development and the studies in this direction, as they emerge, would gain to be known and disseminated in transdisciplinary scientific journals and communities. This very first thematic issue of the *Neuroeducation* journal aims to regroup some of them and coincidentally puts forward two interrelated challenges, specific to this young field of research: (1) the importance of the validity of real-time data for their interpretation, and (2) nearing as close as possible authentic school contexts or educational environments (e.g. Mercier *et al.*, 2012). These two challenges seem to be interfering to the extent that efforts to achieve one can harm the achievement of the other, and vice versa.

This thematic issue includes two experimental studies and two methodological articles, all of which reflect the emergence of the use of psychophysiological data to address educational issues, as well as the above-mentioned double challenge related to validity and authenticity contexts.

The Skelling-Desmeules (2018) article in science didactics presents an experimental research aiming to understand the impact of learners' interest in an educational video game in science (*Mécanika*) on their performance. The cognitive and affective dimensions of situational interest were measured in real time using electroencephalograms and pupillometry.

Di Fabio *et al.*'s (2018) study aims to describe the impact of gestures (hand movements) on the cognitive load of the child, as measured by eye tracking, in a context of mathematical problem solving on a tablet.

The first methodological article, that of Lapierre (2018), is a proof of concept resulting from the development of a technique generating time markers in a video, according to different types of psychophysiological data of a filmed participant, to facilitate the analysis of the data and possibly the interpretation, for example, of the expression of a cognitive state such as behavioral, cognitive and emotional commitment.

Finally, Léger *et al.* (2018) propose a series of methodological recommendations to optimize the balance between valid and reliable eye-tracking data, and the most natural interaction possible of young children with a tablet, in a learning context. These guidelines are derived from three similarly designed studies conducted by the authors.

References

- Antonenko P. D., van Gog T., & Paas F. (2014). Implications of neuroimaging for educational research. In J. Spector, M. Merrill, J. Elen, & M. Bishop (Eds.), *Handbook of Research on Educational Communications and Technology* (pp. 51-63). New York, NY: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3185-5_5
- Boekaerts, M. (2017). Cognitive load and self-regulation: Attempts to build a bridge. *Learning and Instruction*, 51, 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.07.001>
- Campbell, S. R. (2011). Educational neuroscience: Motivation, methodology, and implications. *Educational Philosophy and Theory*, 43(1), 7-16. <https://doi.org/10.1111/j.1469-5812.2010.00701.x>
- Campbell, S. R., & Pagé, P. (2012). La neuroscience éducationnelle: enrichir la recherche en éducation par l'ajout de méthodes psychophysiologiques pour mieux comprendre l'apprentissage. *Neuroéducation*, 1(1), 115-144. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20120101.115>
- Chen, C. H. (2017). Measuring the differences between traditional learning and game-based learning using electroencephalography (EEG) physiologically based methodology. *Journal of Interactive Learning Research*, 28(3), 221-233. <https://www.learntechlib.org/p/174121/>
- Chen, C. M., & Wang, J. Y. (2017). Effects of online synchronous instruction with an attention monitoring and alarm mechanism on sustained attention and learning performance. *Interactive Learning Environments*, 1-17. <https://doi.org/10.1080/10494820.2017.1341938>

- Chen, C. M., & Wu, C. H. (2015). Effects of different video lecture types on sustained attention, emotion, cognitive load, and learning performance. *Computers & Education*, 80, 108-121. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2014.08.015>
- Conrad, C. D., & Bliemel, M. (2017). Psychophysiological measures of cognitive absorption and cognitive load in e-learning applications. In A. Pär, N. Levina, & S. S. Kien (Eds.), *Proceedings of the 36th International Conference on Information Systems (ICIS)*. Dublin, Ireland: AIS. <http://aisel.aisnet.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1074&context=icis2016>
- Di Fabio, M.-L., Sénécal, S., Léger, P.-M., & Charland, P. (2018). L'influence de la gestuelle sur la charge cognitive en contexte d'apprentissage des mathématiques sur application éducative numérique. *Neuroeducation*, 5(1), 13-25. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20180501.13>
- Dion, J.-S. (2015). Bases théoriques pour l'étude de l'autorégulation enseignante par électroencéphalographie: vers de nouvelles recherches en neuroéducation. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant (A.N.A.E.)*, 27(134), 63-70.
- Durall, E., Leinonen, T., Gros, B., & Rodriguez-Kaarto, T. (2017). Reflection in learning through a self-monitoring device: Design research on EEG self-monitoring during a study session. *Designs for Learning*, 9(1), 10-20. <http://doi.org/10.16993/dfi.75>
- Effeney, G. (2011). *The development of executive function and self-regulated learning in adolescent males*. Ph.D. thesis, University of Queensland, Australia.
- Gerjets, P. (2017). Learning and problem-solving with hypermedia in the twenty-first century: From hypertext to multiple web sources and multimodal adaptivity. In S. Schwan & U. Cress (Eds.), *The Psychology of Digital Learning* (pp. 61-88). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49077-9_4
- Goswami, U. (2010). Neuroscience in education. In C. L. Cooper, J. Field, U. Goswami, R. Jenkins, & B. J. Sahakian (Eds.), *Mental Capital and Wellbeing* (pp. 55-62). Oxford, UK: Wiley-Blackwell.
- Lapierre, H. G. (2018). Exploration automatisée de données vidéo à partir d'un fil de données psychophysologiques : une preuve de concept en sciences de l'éducation. *Neuroeducation*, 5(1), 26-32. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20180501.26>
- Lee, L., Lee, M., Lee, H., Guiroy, I., Hong, T., & Williams, W. (2006). Quantitative EEG as an identifier of learning modality. U.S. Patent Application No. 11/430,555. <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US20060257834.pdf>
- Léger, P.-M., Sénécal, S., Karpova, É., Briegne, D., Di Fabio, M.-L., & Georges, V. (2018). Setup guidelines for eye tracking in child and teenager research in the context of learning by interacting with a tablet. *Neuroeducation*, 5(1), 33-40. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20180501.33>
- Liu, X., Tan, P. N., Liu, L., & Simske, S. J. (2017). Automated classification of EEG signals for predicting students' cognitive state during learning. In *Proceedings of the International Conference on Web Intelligence* (pp. 442-450). New York, NY: ACM. <https://doi.org/10.1145/3106426.3106453>
- Masson, S., & Borst, G. (Eds.). (2017). *Méthodes de recherche en neuroéducation*. Québec: Presses de l'Université du Québec.
- Mercier, J., & Charland, P. (2013). An agenda for neuroeducation: relating psychophysiological and behavioral data across time scales of learning. *Neuroeducation*, 2(1), 71-86. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20130201.71>
- Mercier, J., Léger, P.-M., Girard, C., & Dion, J.-S. (2012). Bridging the gap between cognitive neuroscience and education: Psychophysiological and behavioral data collection in authentic contexts. *Neuroeducation*, 1(1), 5-28. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20120101.5>
- Mills, C., Fridman, I., Soussou, W., Waghay, D., Olney, A. M., & D'Mello, S. K. (2017). Put your thinking cap on: Detecting cognitive load using EEG during learning. In *Proceedings of the Seventh International Learning Analytics & Knowledge Conference* (pp. 80-89). New York, NY: ACM. <https://doi.org/10.1145/3027385.3027431>
- Schwartz, N. H., Scott, B. M., & Holzberger, D. (2016). Metacognition: A closed-loop model of biased competition-evidence from neuroscience, cognition, and instructional research. In R. Azevedo & V. Aleven (Eds.), *International Handbook of Metacognition and Learning Technologies* (pp. 79-94). New York, NY: Springer Science+Business Media. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5546-3_6
- Skelling-Desmeules, Y. (2018). Impacts des dimensions cognitives et affectives de l'intérêt situationnel sur la performance à un jeu vidéo éducatif en science. *Neuroeducation*, 5(1), 7-12. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20180501.7>
- Timms, M., DeVelle, S., & Lay, D. (2016). Towards a model of how learners process feedback: A deeper look at learning. *Australian Journal of Education*, 60(2), 128-145. <https://doi.org/10.1177/0004944116652912>
- Wu, C.-H., Tzeng, Y.-L., & Huang, Y. M. (2014). Understanding the relationship between physiological signals and digital game-based learning outcome. *Journal of Computers in Education*, 1(1), 81-97. <https://doi.org/10.1007/s40692-014-0006-x>

RECHERCHE EXPÉRIMENTALE

**Impacts des dimensions cognitives et affectives de l'intérêt
situationnel sur la performance à un jeu vidéo éducatif en science**

Yannick Skelling-Desmeules^{1*}

RÉSUMÉ

Cette étude cible le lien entre l'intérêt situationnel et la performance au cours d'une séance de jeu vidéo éducatif. Dix-sept participants universitaires ont pris part à l'étude. Le devis expérimental consistait à jouer à 12 niveaux de *Mécanika*, un jeu vidéo éducatif en physique prenant la forme d'épreuves de type casse-tête. Tout au long de l'expérience, la dimension affective de l'intérêt situationnel a été mesurée par activité électrodermale (activation) et par reconnaissance faciale des émotions (valence). La dimension cognitive de l'intérêt situationnel a été mesurée par électroencéphalographie (engagement cognitif dans la tâche, charge mentale) et par dilatation pupillaire (charge mentale). La performance était mesurée à l'aide du temps de complétion de chaque niveau. Une régression multiple démontre que l'intérêt situationnel mesuré prédit significativement la performance pour chaque niveau. La dimension cognitive de l'intérêt situationnel serait par ailleurs un meilleur prédicteur de la performance que la dimension affective. Les implications de cette étude fournissent des pistes pour la recherche dans le domaine des jeux vidéo éducatifs, notamment sur l'importance du rôle de la dimension cognitive de l'intérêt situationnel.

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

*Correspondance avec l'auteur : skelling_desmeules.yannick@uqam.ca

Pour citer cet article: Skelling-Desmeules, Y. (2018). Impacts des dimensions cognitives et affectives de l'intérêt situationnel sur la performance à un jeu vidéo éducatif en science. *Neuroéducation*, 5(1), 7-12.

DOI: <https://doi.org/10.24046/neuroed.20180501.7>

1. Introduction

L'importance d'une éducation scientifique de qualité pour une société n'est plus à démontrer (NSF, 2004; OCDE, 2014). Cependant, de nombreuses études publiées depuis 1976 rapportent un déclin de l'intérêt pour les sciences chez les élèves (Barnby *et al.*, 2008; Osborne, Simon et Collins, 2003; Potvin et Hasni, 2014). Ce dernier est à considérer sérieusement, puisque plusieurs chercheurs établissent des liens directs entre l'intérêt et l'apprentissage des sciences et des mathématiques (Singh, Granville et Dika, 2002), tout comme pour la réussite scolaire en général (Cavas, 2011; Hidi et Harackiewicz, 2000; Hidi et Renninger, 2006; Potvin et Hasni, 2014). L'intérêt serait donc non seulement désirable, mais central à l'apprentissage.

Plusieurs études émettent diverses recommandations pédagogiques à privilégier pour favoriser l'intérêt des élèves envers les sciences. Parmi celles-ci, on retrouve le travail coopératif (Lorenzo *et al.*, 2006), l'interactivité (Tsai *et al.*, 2008), les rétroactions (Clariana, 1993; Hidi et Renninger, 2006) et la mise en action des apprenants (Hasni et Potvin, 2015). C'est pour ces raisons que les jeux vidéo éducatifs, qui possèdent ces caractéristiques, font maintenant partie d'une tendance mondiale grandissante dans le domaine de l'éducation (Clark, Tanner-Smith et Killingsworth, 2015; Djaouti, 2011).

Bien que certaines études ne détectent pas d'effets des jeux vidéo éducatifs sur l'apprentissage (Boyle *et al.*, 2016), les méta-analyses récentes démontrent que les jeux vidéo éducatifs ont généralement un potentiel en tant que ressources d'apprentissage efficaces lorsqu'utilisés dans des contextes spécifiques (Clark *et al.*, 2015; Sitzmann, 2011; Wouters *et al.*, 2013). Cependant, bien que certaines études rapportent des effets positifs des jeux vidéo sur la motivation, l'intérêt et l'attitude dans des domaines aussi variés que le théâtre (Manero *et al.*, 2015), l'éducation à la santé (Theng *et al.*, 2015), les langues secondes (Calvo-Ferrer, 2017), les mathématiques (Chang *et al.*, 2015), etc., les méta-analyses récentes affirment qu'il n'existe pas encore de consensus clair quant au potentiel des jeux vidéo pour susciter l'intérêt des apprenants dans un contexte d'apprentissage (Clark *et al.*, 2015; Wouters *et al.*, 2013). Dans le cas spécifique des jeux vidéo visant l'apprentissage des sciences, ce manque de consensus serait attribuable au faible nombre d'études portant spécifiquement sur l'enseignement des sciences par le jeu vidéo (Li et Tsai, 2013; Potvin et Hasni, 2014) et le faible nombre d'études ciblant les impacts des jeux vidéo sur l'intérêt plutôt que l'apprentissage (Clark *et al.*, 2015; Li et Tsai, 2013; Wouters *et al.*, 2013).

Bien que les jeux vidéo éducatifs soient généralement abordés par la recherche à travers le concept de motivation (Sitzmann, 2011; Vogel, 2006; Wouters *et al.*, 2013), le modèle de l'intérêt de Hidi et Renninger (2006) sera adopté dans le cadre de cette étude. Ce dernier présente l'intérêt comme ayant les composantes affective et cognitive, permettant une analyse et une compréhension plus fine de l'expérience d'un

apprenant lors d'une tâche d'apprentissage. De plus, l'intérêt situationnel se distingue de l'intérêt individuel en étant déclenché par un stimulus externe et sa grande variabilité temporelle (*ibid.*). Cette définition du concept d'intérêt situationnel, par ses caractéristiques, est applicable à une tâche de jeu vidéo circonscrite dans le temps et conçue pour générer des réactions affectives et cognitives de la part du joueur.

Étant donné que l'intérêt est un facteur de réussite en science, l'approfondissement des connaissances actuelles quant au potentiel des jeux vidéo à déclencher ce dernier devient primordial. Ainsi, il importe de vérifier si le niveau d'intérêt peut être associé à la réussite dans le cadre d'une tâche de jeu vidéo en science, à l'instar d'autres méthodes d'apprentissage. Étant donné les composantes affective et cognitive de l'intérêt situationnel, deux hypothèses sont formulées pour répondre à cette question :

H1 : Un haut niveau d'intérêt situationnel affectif pourra être associé à une meilleure performance dans une tâche de jeu vidéo éducatif en science.

H2 : Un haut niveau d'intérêt situationnel cognitif pourra être associé à une meilleure performance dans une tâche de jeu vidéo éducatif en science.

2. Méthodologie

2.1 Participants

Dix-sept (17) étudiants universitaires (HEC Montréal) ont été recrutés pour participer à la présente étude. Aucun des participants ne connaissait le jeu vidéo éducatif retenu pour la collecte.

Bien que la tâche ait ciblé des contenus abordés en physique de secondaire 5, le choix de mener l'étude avec des participants adultes est justifié en fonction des mesures psychophysiologiques de l'intérêt retenues. D'une part, les mesures de la composante cognitive de l'intérêt situationnel ont été validées chez les adultes (Adam *et al.*, 2014; Jensen et Tesche, 2002; Pope, Bogart et Bartolome, 1995). De plus, étant donné la localisation du laboratoire de collecte de données psychophysiologiques (HEC Montréal), l'accès à une population universitaire était d'autant plus simple sur le plan logistique.

Pour limiter les impacts de l'âge adulte des participants, un des critères de recrutement était de n'avoir jamais suivi de formation scientifique au-delà du secondaire. De nombreux participants ont par ailleurs rapporté que le jeu vidéo était « très difficile ».

2.2 Tâche expérimentale

Pour la présente étude, les participants étaient invités à jouer à *Mécanika*, un jeu vidéo éducatif portant sur la physique

mécanique. Le choix de ce dernier a été effectué sur la base de sa validation par la recherche en tant qu'outil de changement conceptuel efficace en physique (Boucher-Genesse, 2011), et étant un des rares jeux vidéo éducatifs en science dans la langue maternelle des participants. Ce jeu demande au joueur de résoudre divers niveaux de type casse-tête en faisant passer des objets (robots) par des points spécifiques (étoiles). Pour y parvenir, le joueur doit stratégiquement positionner des éléments permettant d'influencer les robots selon des principes de physique. La figure 1 illustre l'interface de jeu. Douze niveaux concernant spécifiquement les concepts de force et d'accélération ont été retenus pour l'expérimentation. Les participants disposaient d'un nombre illimité d'essais pour compléter chacun des niveaux, qui augmentaient graduellement en difficulté. La performance au jeu était mesurée selon le temps requis pour compléter chacun des niveaux du jeu. Le temps maximal pour résoudre un niveau était de cinq minutes pour éviter qu'un joueur ne reste bloqué indéfiniment dans un niveau impossible à résoudre pour lui, et pour prévoir la durée totale de l'expérience pour le participant. Puisque seul un nombre marginal de niveaux n'ont pas été complétés par les joueurs, nous n'avons considéré que les niveaux résolus dans le temps alloué. Ce choix méthodologique vise à éliminer les effets de plafond temporels liés au protocole.

Figure 1. Interface du jeu *Mécanika*

2.3 Mesures de l'intérêt

Selon le modèle de Hidi et Renninger (2006), l'intérêt situationnel comprend les dimensions affective et cognitive. Étant donné l'aspect instantané de l'intérêt situationnel, des mesures psychophysiologiques ont été privilégiées lors de cette étude. Tous les signaux collectés ont été traités suivant des procédures établies, qui sont décrites dans Charland et al. (2015). Ainsi, la dimension affective de l'intérêt situationnel a été mesurée sur deux continuums distincts, soient la valence et l'activation émotionnelle. La valence émotionnelle fut mesurée par reconnaissance faciale automatique des émotions (Goldberg, 2014), qui établit la probabilité qu'un individu soit dans un état émotionnel positif en fonction de

ses expressions faciales. L'activation émotionnelle fut mesurée par l'activité électrodermale (Boucsein, 2012). Un individu activé aurait en effet une conductivité électrique cutanée accrue au niveau de l'épiderme des mains (*ibid.*).

La dimension cognitive de l'intérêt situationnel fut ciblée par trois mesures. Elle fut d'abord mesurée par un indice d'engagement dans la tâche par électroencéphalographie (EEG) (Pope et al., 1995), qui considère le rapport des fréquences cérébrales *bêta* et *alpha*. Celles-ci sont liées respectivement à un haut niveau d'engagement et à un faible niveau d'engagement dans les régions frontales du cerveau. Deux mesures de charge cognitive ont également été utilisées, soit les fréquences cérébrales *alpha* (Jensen et Tesche, 2002) par EEG et la dilatation de la pupille (Adam et al., 2014). En effet, une charge mentale élevée est liée à un plus grand diamètre de la pupille (Xu et al., 2011). Une fois les données collectées et traitées, la moyenne pour chacun de ces signaux a ensuite été calculée individuellement pour chaque niveau du jeu.

3. Résultats

Pour vérifier le lien entre la performance et l'intérêt situationnel généré par un jeu vidéo éducatif en science, une régression multiple a été menée. Le tableau 1 illustre l'impact de chacune des variables indépendantes sur le temps (en secondes) de résolution des niveaux.

Deux variables modératrices ont d'abord été intégrées au modèle, soit l'estimation du degré de difficulté des niveaux (facile ou difficile; déterminé de façon indépendante et par accord commun entre le chercheur et deux enseignants de science), ainsi que leur ordre de présentation (1 à 12), limitant ainsi les impacts de la difficulté d'un niveau ou les effets d'habitation au jeu. Leurs effets se sont tous deux avérés significatifs. Un niveau difficile était associé à un plus long temps de résolution ($t(131)=9.05$, $p=0.00$). Quant à l'effet d'ordre, nous avons détecté que plus le joueur effectuait de niveaux, plus il tendait vers une bonne performance ($t(131)=3.10$, $p=0.01$). Ce dernier résultat représente l'habitation de l'apprenant au fonctionnement du jeu.

Les mesures électroencéphalographiques de la dimension cognitive de l'intérêt situationnel (index d'engagement dans la tâche, charge mentale) se sont avérées toutes deux être significatives pour prédire le temps de résolution d'un niveau ($t(131)=2.29$, $p=0.04$ et $t(131)=2.49$, $p=0.03$). Ces relations étant négatives et quadratiques, elles signifient que plus la mesure d'engagement cognitif dans la tâche ou la mesure de charge cognitive est élevée, plus rapide est le temps de résolution du niveau de *Mécanika*. Cette relation étant quadratique, l'effet sera davantage prononcé pour les mesures d'engagement ou de charge cognitive élevées. Quant à la charge cognitive mesurée par la dilatation pupillaire, celle-ci s'est avérée significative et linéaire ($t(131)=2.21$, $p=0.05$). Toutefois, cette relation n'allait pas dans le même sens que pour les mesures électroencéphalographiques. Plus la charge cognitive telle que mesurée par la dilatation pupillaire était grande, plus le temps de résolution du niveau avait été long.

Tableau 1. Régression multiple expliquant le temps de résolution d'un niveau par des mesures d'intérêt situationnel

		B	SE B	t	sig.	Intervalle de confiance 95 %	
	Constante	94.98	17.41	5.46	0.00	56.67	133.29
Variables modératrices	Ordre de présentation	-6.01	1.94	3.10	0.01	-10.28	-1.74
	Difficulté du niveau	33.26	3.67	9.05	0.00	25.17	41.35
Dimension affective	Valence (reconnaissance faciale)	-2.07	7.62	0.27	0.79	-18.84	14.70
	Activation (activité électrodermale)	0.85	14.39	0.06	0.95	-30.83	32.52
Dimension cognitive	Engagement dans la tâche (EEG)	-5.99	18.50	0.32	0.75	-46.71	34.73
	Engagement dans la tâche - carré (EEG)	-44.84	19.60	2.29	0.04	-87.97	-1.70
	Charge cognitive (EEG)	-10.44	6.25	1.67	0.12	-24.19	3.31
	Charge cognitive - carré (EEG)	-10.87	4.36	2.49	0.03	-20.48	-1.27
	Charge cognitive (dilatation pupillaire)	16.94	7.68	2.21	0.05	0.04	33.84

N=132; F(9,11)=0.000; R²=0.35

Il est à noter qu'aucune mesure de la dimension affective de l'intérêt situationnel ne s'est avérée significative pour prédire le temps de résolution d'un niveau, et ce, tant pour la mesure de la valence émotionnelle par reconnaissance faciale des émotions ($t(131)=0.27$, $p=0.79$) que pour la mesure de l'activation par l'activité électrodermale ($t(131)=0.06$, $p=0.95$).

Finalement, le modèle complet s'est avéré un prédicteur significatif du temps de résolution d'un problème de *Mécanika*, expliquant 35 % de la variance du temps de résolution d'un niveau ($R^2=0.35$).

4. Discussion

La présente étude aborde l'intérêt situationnel dans le contexte d'un jeu vidéo éducatif, et plus précisément son impact sur la performance en jeu. Notre étude démontre qu'un modèle tenant compte des dimensions cognitive et affective de l'intérêt situationnel est un prédicteur significatif du temps de résolution d'un niveau de jeu. Ce résultat est un argument supplémentaire pour justifier la pertinence de cibler l'intérêt comme variable cruciale dans le domaine du jeu vidéo éducatif en science.

Le modèle complet, incluant les dimensions cognitive et affective, a été rapporté. Cependant, aucune des mesures de la dimension affective de l'intérêt situationnel n'a eu d'impact significatif sur la prédiction de la performance au jeu (H1), alors que toutes les mesures de la dimension cognitive se sont

avérées significatives (H2). Ce résultat pourrait s'avérer intéressant pour le domaine du design de jeu éducatif. En effet, dans les processus de création de jeux vidéo éducatifs, il pourrait être plus pertinent de miser sur des éléments de jeu favorisant l'engagement cognitif ou l'effort mental (p. ex. un puzzle) plutôt que sur des éléments visant à activer le joueur ou lui faire vivre une expérience agréable (p. ex. une histoire). Bien que des auteurs rapportent que l'âge n'influence pas les facteurs de motivation pour s'engager dans un jeu vidéo éducatif (Manero et al., 2017), il demeure néanmoins que cette dernière conclusion doit être considérée avec prudence. En effet, un échantillon situé dans l'âge cible de *Mécanika* (secondaire 5) pourrait apporter davantage de crédibilité aux résultats obtenus.

Il est à noter que les deux mesures de la dimension cognitive de l'intérêt situationnel (engagement dans la tâche par EEG et charge mentale par dilatation pupillaire) se sont avérées toutes deux significatives mais contradictoires. Nous attribuons ce manque d'accord entre ces indices au fait qu'une tâche effectuée devant un écran lumineux pourrait avoir un impact notable sur la dilatation pupillaire, la rendant moins fiable que l'EEG. Cette difficulté à mesurer la charge cognitive par la dilatation pupillaire dans une tâche à la luminosité variable est corroborée par plusieurs auteurs, qui affirment que les effets de luminosité d'une tâche éclipsent la lecture de charge mentale (Kramer, 1991; Marshall, 2002; Xu et al., 2011). À notre compréhension, cela justifie ainsi la plus grande crédibilité des mesures recueillies par EEG.

Bien que cette étude ait ciblé la performance dans un niveau de jeu vidéo éducatif comme variable centrale, il aurait été souhaitable de lier l'intérêt situationnel directement à l'apprentissage, qui est la finalité ultime des jeux vidéo éducatifs. En effet, la performance ne représente pas en soi l'apprentissage. Pour pouvoir cibler l'apprentissage plutôt que la performance avec un devis similaire, il serait pertinent de sélectionner des niveaux faisant référence à des concepts différents. L'apprentissage pour chacun des niveaux pourrait alors être mesuré par pré et posttest, et lié aux composantes affective et cognitive de l'intérêt situationnel.

Finalement, un des grands avantages de l'utilisation de mesures physiologiques est leur excellente résolution temporelle. Bien que nous ayons uniquement considéré la moyenne des différentes mesures lors d'un niveau de jeu, *Mécanika* contient de nombreux éléments-clés (tutoriels, aide en jeu, résolution de problèmes, renforcements positifs, etc.) présentés à divers moments, dépendamment des actions des joueurs. Les mesures physiologiques de l'intérêt permettraient de cibler ces éléments-clés pour lesquels il importe de favoriser l'intérêt situationnel. Ces connaissances pourraient indiquer aux développeurs de jeux vidéo éducatifs les principaux éléments qui intéressent les joueurs sur les plans affectif et cognitif et les effets de ceux-ci sur la performance au jeu. Au niveau de la salle de classe, la présence de ces éléments-clés pourrait fournir aux enseignants un outil supplémentaire pour leur sélection de jeux vidéo éducatifs à intégrer dans leur milieu d'enseignement.

Références

- Adam, J. J., Bovend'Eerd, T. J., Smulders, F. T. et Van Gerven, P. W. (2014). Strategic flexibility in response preparation: Effects of cue validity on reaction time and pupil dilation. *Journal of Cognitive Psychology*, 26(2), 166-177. <https://doi.org/10.1037/e636952013-294>
- Barmby, P., Kind, P. M. et Jones, K. (2008). Examining changing attitudes in secondary school science. *International Journal of Science Education*, 30(8), 1075-1093. <https://doi.org/10.1080/09500690701344966>
- Boucher-Genesee, F. (2011). Étude de différentes utilisations d'un jeu vidéo éducatif conçu spécifiquement pour intervenir sur certaines conceptions en physique mécanique : *Mécanika*. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, Canada. Repéré à <http://www.archipel.uqam.ca/5833/>
- Boucsein, W. (2012). *Electrodermal activity*. New York, NY: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1126-0>
- Boyle, E. A., Hainey, T., Connolly, T. M., Gray, G., Earp, J., Ott, M., ... et Pereira, J. (2016). An update to the systematic literature review of empirical evidence of the impacts and outcomes of computer games and serious games. *Computers & Education*, 94, 178-192. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.11.003>
- Calvo-Ferrer, J. R. (2017). Educational games as stand-alone learning tools and their motivational effect on L2 vocabulary acquisition and perceived learning gains. *British Journal of Educational Technology*, 48(2), 264-278. <https://doi.org/10.1111/bjet.12387>
- Chang, M., Evans, M. A., Kim, S., Norton, A. et Samur, Y. (2015). Differential effects of learning games on mathematics proficiency. *Educational Media International*, 52(1), 47-57. <https://doi.org/10.1080/09523987.2015.1005427>
- Charland, P., Léger, P.-M., Sénécal, S., Courtemanche, F., Mercier, J., Skelling, Y. et Labonté-Lemoyne, E. (2015). Assessing the multiple dimensions of engagement to characterize learning: A neurophysiological perspective. *Journal of Visualized Experiments*, (101). <https://doi.org/10.3791/52627>
- Clariana, R. B. (1993). A review of multiple-try feedback in traditional and computer-based instruction. *Journal of Computer-Based Instruction*, 20(3), 67-74.
- Clark, D. B., Tanner-Smith, E. E. et Killingsworth, S. S. (2015). Digital games, design, and learning: A systematic review and meta-analysis. *Review of Educational Research*, 86(1), 79-122. <https://doi.org/10.3102/0034654315582065>
- Djaouti, D., Alvarez, J., Jessel, J. P. et Rampnoux, O. (2011). Origins of serious games. Dans M. Ma, A. Oikonomou et L. Jain (dir.), *Serious games and edutainment applications* (p. 25-43). Londres: Springer-Verlag London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2161-9_3
- Goldberg, J. H. (2014). Measuring software screen complexity: Relating eye tracking, emotional valence, and subjective ratings. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 30(7), 518-532. <https://doi.org/10.1080/10447318.2014.906156>
- Hasni, A. et Potvin, P. (2015). Student's interest in science and technology and its relationships with teaching methods, family context and self-efficacy. *International Journal of Environmental and Science Education*, 10(3), 337-366. <https://doi.org/10.12973/ijese.2015.249a>
- Hidi, S. et Harackiewicz, J. (2000). Motivating the academically unmotivated: A critical issue for the 21st century. *Review of Educational Research*, 70(2), 151-179. <https://doi.org/10.2307/1170660>
- Hidi, S. et Renninger, A. K. (2006). The Four-Phase Model of interest development. *Educational Psychologist*, 41(2), 111-127. https://doi.org/10.1207/s15326985ep4102_4

- Jensen, O. et Tesche, C. D. (2002). Frontal theta activity in humans increases with memory load in a working memory task. *European Journal of Neuroscience*, 15(8), 1395-1399. <https://doi.org/10.1046/j.1460-9568.2002.01975.x>
- Kramer, A. F. (1991). Physiological metrics of mental workload: A review of recent progress. Dans D. L. Damos (dir.), *Multiple-task performance* (p. 279-328). Londres, Royaume-Uni / Washington, DC : Taylor & Francis.
- Li, M. C. et Tsai, C. C. (2013). Game-based learning in science education: A review of relevant research. *Journal of Science Education and Technology*, 22(6), 877-898. <https://doi.org/10.1007/s10956-013-9436-x>
- Lorenzo, M., Crouch, C. H. et Mazur, E. (2006). Reducing the gender gap in the physics classroom. *American Journal of Physics*, 74(2), 118-122. <https://doi.org/10.1119/1.2162549>
- Manero, B., Torrente, J., Fernandez-Vara, C. et Fernandez-Manjon, B. (2017). Investigating the impact of gaming habits, gender, and age on the effectiveness of an educational video game: An exploratory study. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 10(2), 236-246. <https://doi.org/10.1109/tlt.2016.2572702>
- Marshall, S. P. (2002). The index of cognitive activity: Measuring cognitive workload. Dans *Proceedings of the IEEE 7th Conference on Human Factors and Power Plants* (p. 7.5-7.9). <https://doi.org/10.1109/hfpp.2002.1042860>
- National Science Foundation. (2004). *Science and Engineering Indicators 2004* (Vol. 1). Arlington, VA: National Science Foundation. <https://www.nsf.gov/statistics/archive-goodbye.cfm?p=www.nsf.gov/statistics/seind04>
- OCDE. (2014). *Regards sur l'éducation 2014 : Les indicateurs de l'OCDE*. Paris : Éditions OCDE. <https://www.oecd.org/edu/Regards-sur-l'education-2014.pdf>
- Osborne, J., Simon, S. et Collins, S. (2003). Attitudes towards science: A review of the literature and its implications. *International Journal of Science Education*, 25(9), 1049-1079. <https://doi.org/10.1080/0950069032000032199>
- Pope, A. T., Bogart, E. H. et Bartolome, D. S. (1995). Biocybernetic system evaluates indices of operator engagement in automated task. *Biological Psychology*, 40(1-2), 187-195. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(95\)05116-3](https://doi.org/10.1016/0301-0511(95)05116-3)
- Potvin, P. et Hasni, A. (2014). Interest, motivation and attitude towards science and technology at K-12 levels: A systematic review of 12 years of educational research. *Studies in Science Education*, 50(1), 85-129. <https://doi.org/10.1080/03057267.2014.881626>
- Singh, K., Granville, M. et Dika, S. (2002). Mathematics and science achievement: Effects of motivation, interest, and academic engagement. *The Journal of Educational Research*, 95(6), 323-332. <https://doi.org/10.1080/00220670209596607>
- Sitzmann, T. (2011). A meta-analytic examination of the instructional effectiveness of computer-based simulation games. *Personnel Psychology*, 64(2), 489-528. <https://doi.org/10.1111/j.1744-6570.2011.01190.x>
- Theng, Y. L., Lee, J. W., Patinadan, P. V. et Foo, S. S. (2015). The use of videogames, gamification, and virtual environments in the self-management of diabetes: A systematic review of evidence. *Games for Health Journal*, 4(5), 352-361. <https://doi.org/10.1089/g4h.2014.0114>
- Tsai, Y. M., Kunter, M., Lüdtke, O., Trautwein, U. et Ryan, R. M. (2008). What makes lessons interesting? The role of situational and individual factors in three school subjects. *Journal of Educational Psychology*, 100(2), 460-472. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.100.2.460>
- Vogel, J. J., Vogel, D. S., Cannon-Bowers, J., Bowers, C. A., Muse, K. et Wright, M. (2006). Computer gaming and interactive simulations for learning: A meta-analysis. *Journal of Educational Computing Research*, 34(3), 229-243. <https://doi.org/10.2190/flhv-k4wa-wpvq-h0ym>
- Wouters, P., van Nimwegen, C., van Oostendorp, H. et van der Spek, E. D. (2013). A meta-analysis of the cognitive and motivational effects of serious games. *Journal of Educational Psychology*, 105(2), 249-265. <https://doi.org/10.1037/a0031311>
- Xu, J., Wang, Y., Chen, F. et Choi, E. (2011). Pupillary response based cognitive workload measurement under luminance changes. Dans P. Campos, N. Graham, J. Jorge, N. Nunes, P. Palanque et M. Winckler (dir.), *Human-Computer Interaction - INTERACT 2011. Lecture Notes in Computer Science* (p. 178-185, Vol. 6947). Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23771-3_14

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^{1*}, Sylvain Sénécal¹, Pierre-Majorique Léger¹ et Patrick Charland²

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.

¹ HEC Montréal, Tech3Lab, Montréal, Canada

² 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

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^{er} 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; Shoval, 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 (Tomprowski 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^e 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.

Use the graph to solve the problem.

Fasteners

How Our Jackets Are Fastened					
zippers					
buttons					

0 1 2 3 4 5

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

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 astigmates, 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
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 ^a		Modèle 2 ^b	
	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

^a $n=169$; $F(1, 9)=5.42$; Prob > F=0.0448; R-squared=0.0118; Root MSE=0.43418

^b $n=169$; $F(3, 9)=2.31$; Prob > F=0.1454; R-squared=0.0232; 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 ^a		
	Coefficient	$P > t $
Difficulté	0.01	0.466
Pointer	-0.07	0.013
Dénombrer	-0.04	0.040
Constante	0.14	0.000

^a $n = 165$; $F(3, 9) = 3.57$; $\text{Prob} > F = 0.0600$; $R\text{-squared} = 0.0389$; $\text{Root MSE} = 0.11223$

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
- 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^e 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
- 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 11th 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
- 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
- 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
- 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

MÉTHODOLOGIE

**Exploration automatisée de données vidéo
à partir d'un fil de données psychophysiologiques : une preuve de
concept en sciences de l'éducation**

Hugo G. Lapierre^{1*}

RÉSUMÉ

Bien que la collecte de données vidéo soit de plus en plus présente en recherche, notamment due à une accessibilité et une facilité d'utilisation accrue des technologies permettant l'enregistrement vidéo, les analyses liées à de tels outils de collecte demeurent toutefois un réel défi. De nombreux logiciels permettent une analyse accélérée grâce à, notamment, la reconnaissance par image. Cependant, ces techniques ne s'appliquent que peu en éducation, puisque l'apprentissage n'est pas nécessairement lié au mouvement. Ainsi, cet article présente une méthodologie novatrice afin de générer automatiquement des marqueurs temporels sur des données vidéo à partir de données psychophysiologiques. Les apports et limites de cette méthode sont discutés en lien avec la recherche en éducation.

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

*Correspondance avec l'auteur : lapierre.hugo_g@uqam.ca

Pour citer cet article : Lapierre, H. G. (2018). Exploration automatisée de données vidéo à partir d'un fil de données psychophysiologiques : une preuve de concept en sciences de l'éducation. *Neuroéducation*, 5(1), 26-32.

DOI : <https://doi.org/10.24046/neuroed.20180501.26>

Reçu le 14 février 2017. Révision reçue le 30 juin 2017.

Accepté le 6 septembre 2017. Publié en ligne le 1^{er} mars 2018.

Neuroéducation, 5(1), 26-32

ISSN : 1929-1833

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

1. Introduction

Le développement rapide et la disponibilité grandissante de technologies vidéo abordables, faciles d'utilisation et de haute qualité transforment le domaine de la recherche en sciences de l'éducation. En effet l'enregistrement vidéo représente à l'heure actuelle l'outil numérique le plus utilisé pour la recherche en éducation (Altet, 2002), notamment parce qu'il constitue un moyen puissant de collecter, partager, étudier, présenter et archiver des données riches en détails et hautement réutilisables (Derry *et al.*, 2010). C'est donc grâce aux nombreux développements des caméras, des ordinateurs et des logiciels d'édition que l'utilisation de la vidéo est aujourd'hui une option méthodologique de recherche viable.

De nouvelles façons de collecter et de présenter les données vidéo sont également en émergence (Walker, 2002). Par exemple, des séquences vidéo pertinentes peuvent être ajoutées aux rapports et aux documents afin de favoriser une discussion plus riche, de mettre en évidence certains problèmes et d'offrir au lecteur la possibilité d'accéder aux données sous différents formats. Ces séquences vidéo soigneusement sélectionnées dans un document ou une présentation permettent aux chercheurs de présenter et supporter les données d'une manière convaincante et éclairante (Pea, 1999). Plowman (1999) soutient que les avantages d'avoir recours à des données vidéo en recherche sont donc nombreux : facilité d'utilisation, richesse des données, permanence des données dans le temps, possibilité de récupération, ainsi que disponibilité de ces mêmes données pour d'autres chercheurs qui souhaiteraient reproduire les résultats ou trianguler leurs propres données, amenant donc la possibilité de les réinterpréter.

Toutefois, Kleim *et al.* (2008) observent que la collecte de données vidéo est également caractérisée par une surcharge d'informations et de données collectées. En effet, en raison des récents progrès réalisés dans le domaine des technologies digitales et de stockage d'informations, les données vidéo sont produites à un rythme très rapide. Ainsi, les capacités actuelles en termes de collecte et de stockage de données dépassent largement les capacités d'analyse. De plus, la vidéo est un type de données qui, outre le fil temporel auquel s'enchaînent les images, ne comporte pas d'éléments organisateurs (contrairement à un livre qui comporte, par exemple, une table des matières, des pages numérotées, etc.). L'analyse de l'importante quantité de volumes collectés se révèle donc un défi de taille pour le chercheur (Kleim, 2006).

De plus, comme le soulignent Derry *et al.* (2010) dans leur revue de la littérature sur l'utilisation du vidéo pour la recherche en éducation, la sélection objective des données vidéo constitue également un défi important lorsqu'il est question de réaliser un processus de recherche inductif et que la quantité de données à traiter est aussi grande.

Aujourd'hui, un certain nombre de logiciels sont utilisés pour faciliter la tâche des analystes dans l'organisation et l'exploration de ces données vidéo. En effet, de nombreuses équipes de recherche issues de différents domaines ont

déployé des stratégies d'automatisation et des processus d'analyse. Ces dernières leur permettent d'extraire rapidement les informations utiles d'une collecte. Par exemple, en zoologie, la reconnaissance du mouvement est utilisée afin de classifier automatiquement les données enregistrées ; l'observation par vidéo des animaux *in vivo* est utilisée en continu et l'ajout de marqueurs temporels aux données collectées est déclenché automatiquement à l'aide de capteurs de mouvement à ultrasons (Dykes, 2003). Dans le domaine des sports, c'est la reconnaissance par image qui est généralement utilisée ; des logiciels permettent de sélectionner automatiquement des séquences vidéo en fonction des caractéristiques de mouvement par l'analyse des pixels (Andrienko et Andrienko, 2007).

Toutefois, l'éducation s'intéresse aux pratiques enseignantes ou aux processus cognitifs mis en place lors de l'apprentissage. Ce contexte de recherche particulier rend difficile l'utilisation des techniques actuelles afin d'automatiser, complètement ou en partie, l'analyse des données vidéo.

À notre connaissance, aucun logiciel disponible ne possède la fonctionnalité intégrée de générer automatiquement des marqueurs temporels sur des données vidéo en fonction de données psychophysiologiques. À ce titre, au terme de leur revue de la littérature sur l'indexation de séquences vidéo automatisées, Long et Nelson (2013) estiment qu'une plus grande liberté en termes d'importation de fil de données externes devrait être possible afin de faciliter l'analyse de données de mouvement. En parallèle, depuis plusieurs années, en neurophysiologie et psychophysiologie, il existe des méthodes de vidéo télémétrique et des logiciels pour coupler les données psychophysiologiques et vidéo afin de faciliter l'analyse de l'information. Toutefois, les études utilisant ces méthodes mobilisent les données vidéo afin de savoir où analyser des données psychophysiologiques en fonction du comportement d'un participant (Noldus et Bollen, 2017), et non l'inverse.

Cet article vise donc à présenter une technique inédite qui génère des marqueurs dans les données vidéo. Cette technique est basée sur des méthodes empruntées au domaine des neurosciences, où la variation de divers signaux psychophysiologiques (le rythme cardiaque, l'activité électrodermale, les saccades oculaires ou encore le courant électrique mesuré à la surface du crâne) permet d'inférer certains états cognitifs ou émotifs.

L'hypothèse de départ est donc qu'il est possible de générer automatiquement des marqueurs dans des données vidéo lorsque croisées des données psychophysiologiques. Cette technique permet au chercheur de faciliter l'analyse et l'extraction des informations pertinentes en lui pointant certaines séquences potentiellement intéressantes au niveau cognitif et/ou émotif, dépendamment du type de données psychophysiologiques qu'il privilégie.

Cette méthode d'exploration automatisée de données vidéo est présentée ici à partir d'un fil cognitif, une méthode que nous avons développée dû à la problématique précédemment décrite et vécue par le chercheur. Les apports et limites de cette méthode seront ensuite discutés. Les devis expérimentaux et méthodologies découlant d'une telle méthode seront également abordés.

2. Cadre théorique

En sciences de l'éducation, les méthodologies traditionnelles qui permettent l'accès aux sphères cognitives et affectives de l'apprenant, par exemple l'intérêt de l'élève durant une tâche d'apprentissage, impliquent habituellement des données auto-rapportées. Or, Fredricks, Blumenfeld et Paris (2004) rappellent que ces mesures présentent des limites importantes. D'une part, ils affirment qu'il est difficile pour un observateur externe de bien interpréter ce qu'il perçoit chez un sujet. D'autre part, les questionnaires auto-rapportés comportent deux limites additionnelles : le biais d'instantanéité et le bris d'authenticité. Le biais d'instantanéité est lié au fait qu'il est difficile de déterminer si un sujet rapporte, par exemple, son intérêt par rapport à toute la tâche ou aux dernières secondes avant de répondre à un questionnaire. Le bris d'authenticité se crée quand les designs de recherche impliquent que les participants répondent à un questionnaire à plusieurs reprises durant leurs tâches.

Avec le développement récent d'algorithmes basés sur la forte puissance de calcul des ordinateurs, de nouveaux instruments de mesure sont aujourd'hui disponibles. Divers chercheurs (Johnson et al., 2011; Stevens et al., 2010) du champ de la neuroergonomie du travail ont développé des mesures quantitatives et en temps réel des dimensions affectives et cognitives. Leurs méthodes consistent à collecter des données psychophysiologiques à l'aide de divers senseurs normalement utilisés dans le domaine des neurosciences. La psychophysiologie est cette discipline des sciences cognitives qui étudie les réactions physiologiques déclenchées par les mécanismes psychologiques. Ces données transférées en sciences de l'éducation peuvent alors renseigner les chercheurs sur les processus cognitifs et affectifs des sujets de manière instantanée et authentique. Dans le contexte où l'OCDE (2007, p. 24) stipule que les outils de « la neuroscience fournissent des éléments précis quant à savoir comment et pourquoi les êtres humains (ou les cerveaux humains) répondent à différents processus et environnements d'apprentissage », ces techniques s'avèrent intéressantes pour quantifier de manière objective et en temps réel la cognition et l'affection d'un apprenant. Notre équipe de recherche travaille en ce sens depuis plusieurs années ; quelques développements méthodologiques ont permis de mettre en lumière la pertinence du transfert des techniques du domaine de la neuroergonomie vers la recherche en sciences de l'éducation (Charland et al., 2014 ; Charland et al., 2015).

Dans son article paru dans le *Journal of Visualized Experiments*, Charland et ses collègues (2015) décrivent les enjeux de la collecte synchronisée de données psychophysiologiques caractérisant l'engagement comportemental, émotif et cognitif d'apprenants. Basé sur cet article de Charland et al. (2015) et souscrivant à la problématique décrite précédemment, la section suivante présente une méthode d'exploration des données (*data mining*) par la création automatisée de marqueurs sur des données vidéo en fonction de données psychophysiologiques.

3. Preuve de concept : une méthodologie de création de marqueurs automatiques dans les données vidéo en sciences de l'éducation

Nous avons développé une technique en six étapes basée sur l'utilisation d'un de ces logiciels de visualisation et de synchronisation de données vidéo, soit *Noldus Observer XT*, et de *Microsoft Excel*.

Bien que la technique développée soit fonctionnelle pour toutes données psychophysiologiques quantitatives collectées en continu (rythme cardiaque, l'activité électrodermale, les saccades oculaires), nous avons appliqué, dans le cadre de la présente preuve de concept, les marqueurs en fonction d'un indice d'engagement généré à partir de données électroencéphalographiques (EEG).

Étape 0. Collecter les données en simultané. Cette étape implique de collecter en simultané des données psychophysiologiques et des données vidéo synchronisées par une boîte de synchronisation. Considérant l'importance de cette étape, mais surtout sa complexité technique, un article comportant un soutien vidéo complet a été publié par notre équipe de recherche (Charland et al., 2015).

Étape 1. Synchroniser les données à l'aide du logiciel *Observer XT*. Développé par la compagnie *Noldus*, *Observer XT* est un puissant logiciel de visualisation et de synchronisation de données qui supporte à la fois l'importation de vidéo et de multiples types de données externes, en autant que ces données soient en format ASCII et qu'elles soient collectées à un rythme constant. Nous avons importé les données EEG et les données vidéo simultanément dans *Observer XT*, afin de les synchroniser. Tout autre logiciel permettant la synchronisation de données vidéo avec un fil de données en format texte, tel que le format ASCII, fonctionne. La figure 1 illustre la synchronisation des données vidéo et cognitives, où deux séquences vidéo, soit le visage du participant et ses interactions à l'écran, étaient synchronisées. Il n'y a présentement aucun marqueur dans le logiciel, d'où l'espace blanc au-dessus des données cognitives.

Figure 1. Synchronisation des données vidéo et cognitives sur Observer XT

Étape 2. Exporter les données psychophysiologiques synchronisées d'Observer XT horodatées en fonction des données vidéo. Lors de la synchronisation, les données horodatées (timestamps) des vidéos auront été appliquées aux données psychophysiologiques. Nous avons alors exporté les données EEG en format compatible (ASCII) avec le logiciel Excel.

Étape 3. Importer les données psychophysiologiques en format ASCII dans Excel. Le format ASCII est directement compatible avec le logiciel Excel. Le fichier importé contient alors deux colonnes de données : une première contenant les données horodatées et la seconde contenant les données psychophysiologiques correspondantes. La figure 2 démontre une importation des données psychophysiologiques au logiciel Excel.

	A	B	C	D	E	F	G
2	1000 msec/sample						
3	2 channels						
4	Channel EEG						
5	volts						
6	Temps	EEG					
7		1843					
8	0	21.853					
9	0.0166667	21.446					
10	0.0333333	21.052					
11	0.05	20.073					
12	0.0666667	19.336					
13	0.0833333	18.661					
14	0.1	18.057					
15	0.116667	18.077					
16	0.133333	17.547					
17	0.15	17.331					
18	0.166667	16.501					
19	0.183333	16.55					
20	0.2	16.723					
21	0.216667	16.076					
22	0.233333	15.221					
23	0.25	15.601					
24	0.266667	15.029					
25	0.283333	14.475					
26	0.3	13.563					
27	0.316667	13.639					
28	0.333333	13.879					
29	0.35	13.704					
30	0.366667	13.896					
31	0.383333	14.405					
32	0.4	14.935					

Figure 2. Données psychophysiologiques horodatées dans Excel

Étape 4. Générer les marqueurs dans une nouvelle colonne à partir de la colonne de données psychophysiologiques à l'aide d'un filtre statistique. Dans une troisième colonne, à l'aide des fonctions Excel, nous avons généré des valeurs booléennes (représentant les marqueurs) en fonction de tests logiques. Pour notre preuve de concept, nous avons appliqué des marqueurs en fonction des données EEG supérieures à l'écart type moyen à l'aide de la fonction `if: =IF(données_EEG>écart_type;1;0)`. Ces marqueurs sont représentés en orange à la figure 1. Nous avons ensuite répété les six étapes afin de générer des marqueurs plus stricts (représentés en mauve) et moins stricts (représentés en turquoise) en modifiant ce test logique. La figure 3 illustre cette étape.

	A	B	C	D	E	F	G
1	exportation_csv_p14.csv						
2	1000 msec/sample						
3	2 channels						
4	Channel EEG						
5	volts						
6	Temps	EEG	Marqueurs				
7		1843					
8	0	21.853	1				
9	0.0166667	21.446	1				
10	0.0333333	21.052	1				
11	0.05	20.073	1				
12	0.0666667	19.336	1				
13	0.0833333	18.661	1				
14	0.1	18.057	1				
15	0.116667	18.077	1				
16	0.133333	17.547	1				
17	0.15	17.331	1				
18	0.166667	16.501	1				
19	0.183333	16.55	1				
20	0.2	16.723	0				
21	0.216667	16.076	0				
22	0.233333	15.221	0				
23	0.25	15.601	0				
24	0.266667	15.029	0				
25	0.283333	14.475	0				
26	0.3	13.563	0				
27	0.316667	13.639	0				
28	0.333333	13.879	0				
29	0.35	13.704	0				
30	0.366667	13.896	0				
31	0.383333	14.405	0				
32	0.4	14.935	0				

Figure 3. Génération des marqueurs dans Excel

Étape 5. Mettre en page le fichier de marqueurs et l'exporter en format ASCII. Afin d'importer le fichier de marqueurs au logiciel de visualisation des données *Observer XT*, une certaine mise en page doit être respectée. Pour ce faire, nous avons supprimé les lignes ne comportant pas de marqueurs et supprimé la colonne de données EEG. Le fichier comportait alors une première colonne de données horodatées et une seconde de valeurs booléennes (1 ou 0) représentant les marqueurs. L'entête initial doit être conservé. Exporter le tout à partir d'Excel en format ASCII.

Étape 6. Importer le nouveau fichier de marqueurs dans Observer XT. Afin d'importer le fichier de données et que les marqueurs créés soient reconnus par le logiciel, nous avons effectué une importation en tant qu'*Event data* dans *Observer XT*. Il est alors possible de visualiser l'ensemble des segments vidéo issus des marqueurs importés. Encore une fois, tout type de logiciel permettant la visualisation de données vidéo ainsi que l'importation de fichiers de marqueur en ASCII fonctionne. Ainsi, à la figure 4, il est maintenant possible de voir les marqueurs qui ont automatiquement été ajoutés et synchronisés avec les données vidéo et cognitives.

Figure 4. Importation des marqueurs dans Observer XT

À noter que l'utilisation d'un logiciel de visualisation et de synchronisation tel qu'*Observer XT* simplifie le travail d'horodatage des données vidéo. Il permet aussi de naviguer aisément à travers la multitude de données vidéo en effectuant une sélection automatique des segments vidéo en fonction des marqueurs nouvellement importés. Toutefois, cela n'était pas indispensable : la synchronisation aurait pu être effectuée manuellement et la sélection des extraits vidéo pertinents aurait pu être également effectuée manuellement à l'aide des *timestamps* associés aux valeurs booléennes et d'un logiciel d'édition vidéo courant, tel que *Movie Maker* ou *iMovie*. Bien que fastidieuse, cette stratégie pourrait convenir au chercheur intéressé par la méthodologie développée et ne disposant pas de ce logiciel complexe et coûteux.

5. Discussion

La méthodologie développée répond à la problématique de surcharge d'information en proposant un processus de sélection rapide et méthodique de segments vidéo à partir d'un fil de données psychophysologiques. Dans un contexte où plusieurs participants et plusieurs filtres statistiques seraient impliqués, l'automatisation de ces six étapes via la création d'une macro *Excel* pourrait d'autant plus accélérer la sélection des extraits.

Il demeure pertinent de mentionner que nous considérons que le recours aux mesures psychophysiologiques doit s'effectuer avec précaution. En effet, bien qu'il existe des limites dans l'utilisation de certains instruments de mesure traditionnels auto-rapportés, ceux-ci demeurent largement fiables et validés par la recherche en psychologie et en éducation. C'est d'ailleurs dans une perspective de complémentarité avec ces instruments que nous avons développé la méthodologie ci-haut. En effet, une telle méthodologie pourrait être pertinente pour un de nos présents projets : la synchronisation de données vidéo à l'aide de données physiologiques liées à la performance dans une tâche sur l'apprentissage en physique permettra d'établir un lien entre le comportemental et le cognitif. Ainsi, la possibilité de recueillir des données psychophysiologiques en continu permettra de suivre les variations de l'intérêt dans le temps. Cette technique nous apparaît comme une possibilité méthodologique pertinente pour le domaine de l'éducation scientifique, où le déclin de l'intérêt des jeunes est grandissant au fil de la scolarité (Potvin et Hasni, 2014).

Il demeure également important de rester prudent en ce qui concerne l'interprétation des données issues de fil psychophysique, par exemple de l'EEG, car la corrélation de ce

type d'information avec ses processus cognitifs respectifs, souvent complexes, demeure limitée. Par exemple, certaines méta-analyses ne trouvent pas de différences significatives au niveau du fonctionnement du système nerveux, pour suggérer l'existence d'un profil fonctionnel différent pour chaque émotion ou pour les mécanismes motivationnels (Cacioppo et al., 2000).

Aussi, il n'en demeure pas moins que l'utilisation complémentaire de données psychophysiologiques vient limiter les avantages en termes d'accessibilité et d'utilisabilité de l'usage de la vidéo en recherche. En effet, l'appareillage permettant de collecter la plupart des données psychophysiologiques est extrêmement coûteux comparativement au matériel d'enregistrement vidéo, en plus de souvent devoir impliquer du personnel hautement qualifié afin de mener à terme le traitement et l'analyse des données.

Dans tous les cas, considérer simultanément les sphères comportementales, affectives et cognitives de l'apprenant durant une tâche nous permettra de mieux comprendre le phénomène complexe qu'est l'apprentissage. Nous estimons que la méthodologie développée permet la création de nouvelles opportunités de design de recherche en éducation : il devient possible, à l'aide d'une même collecte de données, de faire à la fois un processus inductif et déductif.

Enfin, la méthodologie développée permet l'importation de cadres théoriques provenant, par exemple, des domaines de la neuroergonomie et de la psychophysiologie, afin de soutenir et d'accélérer la recherche exploratoire en éducation, notamment dans les domaines émergents des environnements numériques d'apprentissage, des systèmes tutoriels intelligents ou des jeux vidéo éducatifs où l'avancement des connaissances des mécaniques menant à l'apprentissage est encore limité. En effet, considérant le nombre important d'actions et de rétroactions qu'effectue et reçoit l'apprenant avec ces interfaces informatiques, il demeure difficile, dans ces domaines, d'identifier les mécaniques et variables de l'apprentissage. Ainsi, posséder une résolution temporelle aussi précise de l'interaction affective, cognitive et comportementale lors d'une tâche d'apprentissage permettra d'en faire une analyse plus riche et éclairante.

Références

- Altet, M. (2002). Une démarche de recherche sur la pratique enseignante: l'analyse plurielle. *Revue française de pédagogie*, 138(1), 85-93. <https://doi.org/10.3406/rfp.2002.2866>
- Andrienko, G., Andrienko, N. et Wrobel, S. (2007). Visual analytics tools for analysis of movement data. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, 9(2), 38-46. <https://doi.org/10.1145/1345448.1345455>
- Arroyo, I., Cooper, D. G., Burleson, W., Woolf, B. P., Muldner, K. et Christopherson, R. (2009). Emotion sensors go to school. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, 200(1), 17-24. <http://dx.doi.org/10.3233/978-1-60750-028-5-17>
- Berka, C., Levendowski, D. J., Cvetinovic, M. M., Petrovic, M. M., Davis, G., Lumicao, M. N. et Olmstead, R. (2004). Real-time analysis of EEG indexes of alertness, cognition, and memory acquired with a wireless EEG headset. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 17(2), 151-170. https://doi.org/10.1207/s15327590ijhci702_3
- Cacioppo, J. T., Berntson, G. G., Larsen, J. T., Poehlmann, K. M. et Ito, T. A. (2000). The psychophysiology of emotion. Dans M. Lewis et J. M. Haviland-Jones (dir.), *Handbook of Emotions* (2^e édition) (p. 173-191). New York, NY: Guilford Press.
- Charland, P., Léger, P. M., Mercier, J., Skelling, Y. et Lapierre, H. G. (2016). Measuring implicit cognitive and emotional engagement to better understand learners' performance in problem solving. *Zeitschrift für Psychologie*, 224(4), 294-296. <https://doi.org/10.1027/2151-2604/a000266>
- Charland, P., Léger, P. M., Sénécal, S., Courtemanche, F., Mercier, J., Skelling, Y. et Labonté-Lemoyne, E. (2015). Assessing the multiple dimensions of engagement to characterize learning: a neurophysiological perspective. *Journal of Visualized Experiments*, (101). <https://doi.org/10.3791/52627>
- Derry, S. J., Pea, R. D., Barron, B., Engle, R. A., Erickson, F., Goldman, R. et Sherin, B. L. (2010). Conducting video research in the learning sciences: Guidance on selection, analysis, technology, and ethics. *Journal of the Learning Sciences*, 19(1), 3-53. <https://doi.org/10.1080/10508400903452884>
- Dykes, J. A. et Mountain, D. M. (2003). Seeking structure in records of spatio-temporal behaviour: Visualization issues, efforts and applications. *Computational Statistics & Data Analysis*, 43(4), 581-603. [https://doi.org/10.1016/s0167-9473\(02\)00294-3](https://doi.org/10.1016/s0167-9473(02)00294-3)
- Fredricks, J. A., Blumenfeld, P. C. et Paris, A. H. (2004). School engagement: Potential of the concept, state of the evidence. *Review of Educational Research*, 74(1), 59-109. <https://doi.org/10.3102/00346543074001059>
- Hill, N. M. et Schneider, W. (2006). Brain changes in the development of expertise: Neuroanatomical and neurophysiological evidence about skill-based adaptations. Dans K. A. Ericsson, N. Charness, R. R. Hoffman et P. J. Feltovich (dir.), *The Cambridge Handbook of Expertise and Expert Performance* (p. 653-682). New York, NY: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511816796.037>

- Johnson, M. H. (2011). Interactive specialization: A domain-general framework for human functional brain development? *Developmental Cognitive Neuroscience*, 1(1), 7-21. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2010.07.003>
- Keim, D. A., Andrienko, G., Fekete, J. D., Gorg, C., Kohlhammer, J. et Melançon, G. (2008). Visual analytics: Definition, process, and challenges. Dans A. Kerren, J. T. Stasko, J. D. Fekete et C. North (dir.), *Information Visualization. Lecture Notes in Computer Science* (Vol. 4950) (p. 154-175). Berlin : Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-540-70956-5_7
- Keim, D. A., Mansmann, F., Schneidewind, J. et Ziegler, H. (2006). Challenges in visual data analysis. Conference paper published in *Tenth International Conference on Information Visualisation (IV'06)* (p. 9-16). Londres, Royaume-Uni: IEEE. <https://doi.org/10.1109/iv.2006.31>
- Long, J. A. et Nelson, T. A. (2013). A review of quantitative methods for movement data. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(2), 292-318. <https://doi.org/10.1080/13658816.2012.682578>
- Noldus, L. P., Spink, A. J., Bollen, R. et Heffelaar, T. (2017). Smart mobility: Driver state estimation and advanced driver-vehicle interfaces. Dans M. Tandon et P. Ghosh (dir.), *Mobility Engineering* (p. 11-18). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3099-4_2
- Pea, R. D. (1999). New media communication forums for improving education research and practice. Dans E. C. Lagemann et L. S. Shulman (dir.), *Issues in Education Research: Problems and Possibilities* (p. 336-370). San Francisco: Jossey-Bass. <https://telearn.archives-ouvertes.fr/hal-00190607>
- Plowman, L. (1999). *Using video for observing interaction in the classroom*. Édinburgh: Scottish Council for Research in Education.
- Pope, A. T., Bogart, E. H. et Bartolome, D. S. (1995). Biocybernetic system evaluates indices of operator engagement in automated task. *Biological Psychology*, 40(1-2), 187-195. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(95\)05116-3](https://doi.org/10.1016/0301-0511(95)05116-3)
- Potvin, P. et Hasni, A. (2014). Interest, motivation and attitude towards science and technology at K-12 levels: A systematic review of 12 years of educational research. *Studies in Science Education*, 50(1), 85-129. <https://doi.org/10.1080/03057267.2014.881626>
- Stevens-Adams, S. M., Basilico, J. D., Abbott, R. G., Gieseler, C. J. et Forsythe, C. (2010). Using after-action review based on automated performance assessment to enhance training effectiveness. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 54(27), 2309-2313. <https://doi.org/10.1177/154193121005402719>
- Walker, R. (2002). Case study, case records and multimedia. *Cambridge Journal of Education*, 32(1), 109-127. <https://doi.org/10.1080/03057640220116463>

METHODOLOGY

**Setup guidelines for eye tracking in child and teenager research in
the context of learning by interacting with a tablet**

Pierre-Majorique Léger^{1*}, Sylvain Sénécal¹, Élena Karpova¹, David Briegne¹,
Marie-Laure Di Fabio¹, & Vanessa Georges¹

ABSTRACT

The growing use of tablet-based applications in education increases the importance of testing them in an effective way. Eye tracking devices can now be used to serve this purpose, but these evaluations require valid ecological testing contexts that can affect data quality and validity. The focus of this paper is to propose setup guidelines that will maximize data quality and validity by optimizing the trade-off between steadiness of the visual attention data and natural interaction of the child with a digital educational product. The guidelines are based on three different eye tracking educational studies conducted with children participants.

¹ HEC Montréal, Tech3Lab, Montreal, Canada

*Author email address: pierre-majorique.leger@hec.ca

To cite this article: Léger, P.-M., Sénécal, S., Karpova, E., Briegne, D., Di Fabio, M.-L., & Georges, V. (2018). Setup guidelines for eye tracking in child and teenager research in the context of learning by interacting with a tablet. *Neuroeducation*, 5(1), 33-40.

DOI: <https://doi.org/10.24046/neuroed.20180501.33>

1. Introduction

The usability evaluation of an educational application (digital product) is a crucial step of its development. In user experience research, a commonly used method of usability evaluation is the usability test. It consists in developing a realistic product usage scenario which must be performed by prospective users (Hartson & Pyla, 2012). Given the growing usage of tablet based educational application, it is important to perform high quality usability testing during their development (Donker & Reitsma, 2004). Educational applications draw national education departments' and local schools' attention because of their positive impact on learning outcomes (Masood & Thigambaram, 2015). Usability testing is thus crucial in this context, because it allows one to measure the effectiveness of educational approaches, to adapt user interface design for different ages and to resolve design debates at an early stage of product development (Hanna, Ridsen, & Alexander, 1997).

Conducting usability testing with children is difficult as children may not be willing or able to provide explicit feedback on their experience. Thus, methods capable of measuring unobtrusively the experience of the children bears many benefits (Barendregt & Bekker, 2003). Recently, educational researchers' attention is drawn to eye tracking due to an increased ease of use of this technology (She & Chen, 2009). It is a powerful tool to measure visual attention during realistic usage scenarios and allows one to determine where users look the most, what catches their attention first, and how their visual exploration patterns are deployed (Johansen et al., 2011). Poole and Ball (2006) have summarized various guidelines on the usage of eye tracking technology on adults. They mention the importance of the right positioning of the person, of the calibration procedure and participants' selection considering eye trackers' sensitivity to hard contact lenses, bifocal and trifocal glasses, very large pupils or the "lazy eye" phenomenon. It is also important to have well-defined tasks and minimize non-test related visual distractions to avoid data contamination (Goldberg & Wichansky, 2003).

However, to our knowledge, very few studies have been done to propose guidelines on the usage of eye tracking technology on children and teenagers (Kooiker et al., 2016). While performing usability tests on children, it is crucial to study their natural interactions with educational technology which affects motivation and performance, to isolate their physiological feedback on the digital product features (Read, 2015). It means that testing environment and eye tracker positioning, in particular, have to be tailored to children's natural developmental level (Hanna et al., 1997) to maximize data validity. This paper describes lessons learned from three different eye tracking studies: on elementary school children, on teenagers taking digital notes and lastly on children solving pedagogical robotics problems. We conclude by formulating additional eye tracking setup guidelines for usability tests on a tablet.

2. Literature review

2.1 Eye tracking

Eye tracking is a technique which measures eye movements to indicate where a person is looking at a given moment and the sequence in which eyes are moving from one location to another (Poole & Ball, 2006). Most commonly used eye tracking devices are infrared corneal reflectors. Infrared light is projected on the eyes, where it is reflected twice on the cornea and twice on the lens. Once reflected, the light is recorded by infrared sensitive video cameras. The four different reflections allow to calculate the position and direction of both eyes, even if one eye is usually enough. A calibration procedure is necessary to adjust for anatomical differences among participants (Wipfli, 2008). However, other configurations are also used. Feng (2011) compares the technical differences among remote stationary eye trackers described above and head-mounted systems that allow free movement of the subject, but are not adapted to children and require longer coding.

The results are interpreted based on the eye-mind assumption. In general, eye fixation location reflects attention and eye fixation duration reflects processing difficulty and the amount of attention. The longer the information is fixated, the more complex it is or the more deeply it is processed (Just & Carpenter, 1980). To sum up, eye tracking allows one to understand visual and display-based information processing by the user, as well as factors that may impact system interface usability (Poole & Ball, 2006).

Eye tracking on tablets bears unique specificity. When conducting an eye tracking study in a browser on desktop, the recording software is capable of recording events in the interface, such as the opening of a new web page, in real time. These events are used for analysis to aggregate stimuli across users. Current eye tracking technology is unable to detect those events when the recording is made on a tablet. On such devices, a screen capture is done by the eye tracker and the recording becomes a dynamic scene. A similar limitation exists for mobile eye tracking with lenses. Thus, conducting an eye tracking study on a tablet requires substantial manual coding to obtain those user events essential for the analysis.

2.2 Eye tracking in child and teenager research

Eye tracking is a tool used in various research contexts such as user experience (UX), education and development pathologies. Masood and Thigambaram (2015) investigated the importance of UX in user interface design of mobile educational applications designed for 4- or 5-year-old children. They analyzed eye tracking glasses' data to evaluate interface design of the educational application based on the children's mental model and the quality of learning experience. Eye tracking technology is also known for contributing to find altered gaze patterns across the eyes and the mouth and a failure to orient to biological motion among toddlers with Autism Spectrum Disorder (ASD) (Flack-Ytter, Bolte, & Gredebäck, 2013).

The youngest population studied using eye tracking is 3-month-old babies. The authors suggested that where infants look limits the information input and, therefore, influences the development of the concept of object. Using eye tracking glasses, researchers concluded that some children appear to perceive objects as a whole and others did not (Johnson, Slemmer, & Amso, 2004). Eye tracking technology is also commonly used to help children and adults with impairments. It allows communication operated only by movements of the eyes without using any additional input device such as a keyboard or a mouse (Karamchandani et al., 2015; Poole & Ball, 2006).

In a learning context, eye tracking techniques have the potential to reveal learning processes and problem-solving strategies as well as opening a wide range of research opportunities (Jarodzka et al., 2017). For example, it provides information about which parts of the material are attended to and the length of their processing (She & Chen, 2009; Yen & Yang, 2015). Computer game learning experience (Alka & Cagiltay, 2007) and color coding effects on retention and learning performance have also been studied using eye tracking devices (Ozcelik, 2009).

2.3 General eye tracking guidelines

Most of the studies that used eye tracking on children mention the particular difficulty of the calibration. A child's head is usually anatomically smaller than an adult's and it is hard for a child to limit their head movements during longer usability tests (Gredebäck et al., 2009; Oakes, 2012). It is important to limit a child's head movement not only to get a successful and precise calibration, but also to maintain good quality of the data all over the experiment without losing track of his or her eyes. Sasson and colleagues (2012) mention that seating must allow for vertical adjustment to position a child within eye tracking range regardless of their height and posture. Distance of the chair from the display must be adjusted for the size of the screen and standardized for all participants. The child's eyes must be positioned in the middle of the window to minimize data loss when the child sways, straightens or slouches (Sasson et al., 2012). Researchers suggest using an adjustable-height office chair, a Rifton chair or a car seat (Gredebäck et al., 2009; Sasson et al., 2012). For very young children and for those that are not able or willing to sit straight by themselves, it is preferable to use a portable system such as eye tracking glasses over the stationary one (Oakes, 2012), even if the coding procedure is much more complex.

Hanna and colleagues (1997) have also formulated general children usability testing guidelines. Those include adapting the technology used in the lab to what children are used to manipulate at home, using laboratory equipment in an effective and unobtrusive way, such as using smaller microphones, avoid placing the child in front of the camera or one-way mirror, and allowing particularly young children to manipulate the computer before the test to warm-up. It is important to emphasize that actual positioning guidelines are limited and do not guarantee natural expression of children's

behavior while ensuring quality and consistency of the collected data at the same time.

3. Eye tracking in a mathematics learning context (Study 1)

The first study's objective was to study visual attention in a mathematics learning context among 5- and 6-year-old children (Léger et al., 2017). We were interested in the amount of cognitive load reflected by pupil's diameter (Tsai & Meng-Jung, 2013) and the efficiency of the design of an educational application prototype. The task implied choosing an assignment, solving a simple mathematical problem and clicking, using only one hand, on the right answer among several options. To test multiple hypotheses, an eye tracker Tobii x60 (Tobii Technology AB, Danderyd, Sweden) and a facial expressions analysis software, *Facereader 6* (Noldus, Wageningen, The Netherlands), were used. To consider children using their fingers to count, we also filmed the participant's face with a webcam, his hands with a camera on an articulated arm to capture the moments of clicking on the screen and track his eyes' movements with minimum interruption.

The first setup that was tried was the one originally recommended by Tobii, the manufacturer. The eye tracker was positioned on a triangular prism metallic base with a tablet horizontally on the front face (see figure 1). Even if this positioning is natural from the user's perspective, the upper side of the tablet partially blocked infrared light emitted by the eye tracker, therefore the child's eyes could not be tracked properly. The metallic base allowed adjustment, but the quality of the calibration was poor.

Figure 1. Setup recommended by the manufacturer

For the next iteration, the tablet was fixed to the table with an articulated arm by Manfrotto (Gentec International, Markham, Ontario, Canada). The usage of articulated arms helps to fix the tablet in a natural position. Unfortunately, the quality of eye tracking data was still poor. It was due to the angle of infrared light projection. When the participant

looked at the bottom of the tablet, especially when they had long and voluminous eyelashes, the eye tracker lost his eyes. Generally, with the eye tracker placed in this particular position, the tracking box is restricted. The initial setup being rigid and ineffective, a second articulated arm was added. This time, the eye tracker was fixed with this second arm under the table, below the tablet (see figure 2). This setup allowed us to have the tablet a little closer than the eye tracker and the infrared light was projected more efficiently. The tracking box was bigger and eye tracking data was steadier over the length of the experiment given that children had trouble staying in place without moving their head or looking around. In fact, we succeeded to track at least one eye for 40.8 minutes out of 50, an average computed among 22 participants. In other words, we compare the eye tracking device indication of a weighted gaze of 68% to a maximum needed of 83%, for a task that takes 50 out of 60 minutes of eye tracking recording. The 10-minute difference corresponds to the moments the child receives instructions, turns his head to ask a question and a break between assignments.

Figure 2. Table and eye trackers fixed to articulated arm

The child has to be placed in an ergonomic chair. For the three studies presented in this paper, we used a chair provided by ErgoCentric (Mississauga, Ontario, Canada). Ideally, it should be an ergonomic chair designed specifically for kids. Eyes must be at a minimum distance of 60 cm from the eye tracker. Setup parameters must be adjusted in the Tobii software interface and the child's eyes must stay in the tracking box. An assistant must remind the child to keep a good posture and avoid unnecessary head and hand movements if they are too agitated. This setup allows a maximum efficient trade-off between context authenticity and eye tracking data quality.

4. Eye tracking in note-taking context with teenagers (Study 2)

The second study's objective was to study visual attention in digital note-taking context among 14- to 17-year-old teenagers. We were interested in the emotional state of the student, the amount of cognitive load generated by the activity and note-taking effectiveness. The task implied reading an informational text while highlighting certain texts and annotating the others. In this case, the corpulence of teenagers versus young kids and the task itself added challenge to the setup because note-taking implies using both hands, therefore the risk of blocking the eye tracker was higher.

Since we had success collecting good quality data with the final setup of the previous study, it was the first setup tried for this one (see figure 2). However, when the teenager was taking notes, their hands blocked infrared light emitted by the eye tracker (in the first study, it was not a problem because participants only had to touch the screen once to answer the mathematical question). They reported also being very tired after the first 30 minutes of the experiment, and therefore started to lean towards the tablet and press their head on their hands making not only the eye tracking, but FaceReader data unusable too. The eyes were captured 35% of the overall length of the 90-minute experiment.

Given the ergonomic complexity of the task, SMI Eye Tracking Glasses 2 (SensoMotoric Instruments, Berlin, Germany) were tested. This measurement instrument usually allows faster calibration and steady data collection. However, when we tested it in the note-taking context, important drawbacks were revealed. First, data can not be analysed by creating areas of interest as the scene is dynamically moving with the head of the participant. It is also impossible to see the recording of the bottom of the tablet since the participant was sometimes lowering their eyes without moving their head. Moreover, facial expression recognition software does not work because eye tracking glasses hide contractions of facial muscles such as procerus and orbicularis oculi.

Continuing the iterative process, we manufactured a table with a hole under which the eye tracker would be placed (see figure 3). A portable eye tracker SMI RED250mobile (SensoMotoric Instruments, Berlin, Germany) was tried first and results were unsuccessful.

Figure 3. Table with a hole and the eye tracker positioned under the table

Keeping the idea of the tablet placed directly on the table, we fixed the Tobii x60 eye tracker directly under the table with strings first, then with a plastic storage cube for greater stability and safety (see figure 4). The issue was that the participant's arms and legs could not only damage the costly instrument but also block infrared rays emitted from the ends of the device. The solution we came up with implied using red markers placed on the bottom ends of the tablet not to be crossed by the participant's hands and asking the participant to keep their legs apart. This setup was tested on five teenagers and contrary to first impression, these restrictions did not bother them. However, the quality of eye tracking data was not steady across participants. For those who were taller, the calibration process took longer, and eyes were found by the eye tracker, on average, during 23 out of 60 minutes. Taller participants also had more discomfort trying to keep a good posture with this setup.

Figure 4. Eye tracking under the table with table in flat position on the table

Finally, for data collection in note-taking context, we kept the setup with articulated arms for both the tablet and the eye tracker (see figure 5). Only few adjustments are required: the tablet must be positioned a little closer to the participant, and a little higher as well, to avoid unnecessary leaning and improve posture. The virtual keyboard of the tablet must be split in two so that the hands do not block the eye tracker, and also for additional comfort. The eye tracking data is very steady (at least one of the participant's eyes is tracked, on average, 56 out of 60 minutes, following previous study eye tracking quality measurement logic) and the positioning is most natural. Participants concluded that this setup is very close to their natural use of a digital tablet with a stand.

Figure 5. Final setup with eye tracker closer to the participant

5. Eye tracking in educational robotics with children (Study 3)

LEGO Education WeDo Construction Set is a robotics hardware and software platform designed to initiate children from 5 to 8 years old to programming and engineering. The task implies completing an assignment on the tablet to, step by step, build and, in parallel, program a robot. For example, the learner constructs a crocodile and then makes it move forward using a visual programming language. While the student is performing the task, a teacher interacts with him, asking questions about his progression and monitoring him. The goal of this study was to gain deeper understanding of assisted learning in educational robotics.

Given that two stimuli of a different nature, the tablet and the robot, share the child's attention, eye tracking glasses have been used for both the child and the teacher. They follow the participants' eyes without any physical restriction. The main challenge of this study is to capture data in a way that would optimize its analysis.

Part of the proposed analysis is the construction of heat maps that indicate where the child looked the most and what parts of the stimuli have been processed with more depth on both

stimuli, the tablet and the robot. Since the robot is a 3D item, the heat maps must be created by manually transferring the data collected by the eye tracking glasses, fixation by fixation, on each of its faces to be able to interpret and visualise it.

In the case of the tablet, it is important to fix it in front of the child using an articulated arm, so the child does not have to hold the heavy device in their hands and constantly move it (similar to the set up in figure 2).

Figure 6. Eye tracking with glasses

It is better for the surface of reference to be stable to keep the analysis feasible and interpret the data correctly. Parts that are used to build the robot must be placed close to the tablet, ideally on the right or left side from the tablet depending if the child is right- or left-handed. The overall positioning must be comfortable for both the teacher and the student, and both have to clearly see the tablet. Not only will this ensure ecological validity of the data, but it will also allow one to analyse mutual gaze patterns by synchronising eye tracking data of the student and the teacher.

A sufficiently large corner desk would be an ideal solution to avoid unnecessary movements that will not only make the experience longer but also increase the amount of data to be filtered and analysed. It is also important to position the person who has the role of the teacher in a way that allows them to clearly see the tablet and child's manipulations. The child's chair should allow rotation to increase the child's comfort and allow fluid movements.

5. Discussion

Eye tracking is a powerful tool to study the visual attention of learners by identifying their eye movements and the depth at which they process the information (Hyönä et al., 2002; Yen & Yang, 2015). Eye tracking data has the potential as a tool to assess the effectiveness of educational software and approaches (Hanna et al., 1997) and research avenues have recently been proposed (Jarodzka et al., 2017).

However, to take advantage of it properly, it is important to optimize its potential. First, it is crucial to carefully select an eye tracking device appropriate to the task or the software being tested. A proper positioning of a child maximizes the probability of tracking their eyes steadily, but should also recreate an authentic and ergonomic environment to ensure data quality and validity. Building upon the three studies described in the previous sections, we are able to formulate additional guidelines to those already existing in the literature.

Guideline #1: Choosing the appropriate eye tracking device category

As for any eye tracking study, it is important to adapt the choice of the eye tracking device to the task that is being tested. With children, their height and posture depart from the manufacturer's assumption in their guidelines. Eye tracking glasses are more adapted to a context that requires movements, such as walking and moving the head, but will necessitate manual coding and reduce precision. Remote eye trackers such as Tobii x60 that we used are more adapted to tasks that require manipulating a tablet, reading, and other types of subtle eye movements. The portable remote eye trackers such as SMI RED250mobile are usually more suited for tasks on a desktop computer or laptop. Based on our experience, placing the eye tracking device below the tablet leads to more precise results with children.

Guideline #2: Ensuring acceptable calibration with remote eye trackers

First, manufacturers provide specific calibration instructions for the eye tracking device. There is often a minimum and a maximum distance between the eyes and the instrument. Being able to move the eye tracker back and forth provides the required adjustment range for the initial setup; the use of articulated arms for both the eye tracker and the tablet is thus suggested. The eye tracker should be placed under the table below the tablet to maximize the tracking box (see figures 2 and 5). The tablet should stand out a little. Once an acceptable calibration is successfully obtained, the setup must remain fixed during the data collection part of the study to facilitate the analysis of visual attention data, while chair dimensions should be adjusted for each participant.

Guideline #3: Ensuring eye tracking data steadiness

If the nature of the task represents a risk for eye tracking data steadiness, as it was the case in the study of digital note-taking where both hands were used and could potentially obstruct the infrared light emitted by eye tracking, precautions should be taken. This is often an issue when it comes to using remote eye trackers. In Study 2, a split digital keyboard has been enabled as the tablet settings so that the hands of the participants avoid interfering with the eye tracker. As participants were teenagers, their longer legs had to be kept apart too. In the first study, hands movement was not a concern since the task implied using only one hand to

click on an answer. In this case, the natural flexion of the elbow joint was not a concern for data steadiness.

Another issue in usability testing with young children is their inability to avoid unnecessary movements and concentrate on the tablet. It is essential to make them understand the importance of looking at the tablet and maintain a good posture without leaning forward or leaning backwards and to remind them about it during the experiment if needed. In our experience, they should also be reminded to keep their hands away from their face at regular intervals.

Guideline #4: Optimizing ecological validity

The measurement dilemma being difficult to solve, researchers must make sure an authentic context for efficient usability and hypothesis testing is reproduced as closely as possible. This principle applies to all the guidelines presented above.

Children should be as comfortable as possible and the setup itself must interfere minimally with the task being tested. It is suggested to use a sufficiently large desk and an ergonomic chair designed for children, and to position the tablet in a way that avoids holding the heavy device or leaning towards it to be able to perform its task. The eye level should be the reference.

A comfortable setup will avoid any unnecessary movement that could damage data steadiness and complicate the analysis. Finding the right setup may require a series of tests and iterations.

6. Conclusion

Research that leverages neuroscientific measures such as eye tracking data has potential in education (Jarodzka, Holmqvist, & Gruber, 2017). However, it is important to find the optimal setup of the eye tracker to measure visual attention with a high degree of validity and reliability. The aforementioned specific guidelines should help researchers in developing research protocols allowing to recreate these ecologically valid contexts to properly and efficiently measure visual attention when children interact with educational applications.

References

- Alkan, S., & Cagiltay, K. (2007). Studying computer game learning experience through eye tracking. *British Journal of Educational Technology*, 38(3), 538–542. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8535.2007.00721.x>
- Barendregt, W., & Bekker, M. (2003). *Guidelines for user testing with children*. Technical report. Eindhoven, The Netherlands: Eindhoven University of Technology. http://www.undesigining.nl/productergonomie/wp-content/uploads/2010/11/Guidelines_for_user_testing_with_children.pdf
- Donker, A., & Reitsma, P. (2004, June). Usability testing with young children. *Proceedings of the 2004 conference on Interaction design and children building a community - IDC '04* (pp. 43–48). New York, NY: ACM. <https://doi.org/10.1145/1017833.1017839>
- Falck-Ytter, T., Bölte, S., & Gredebäck, G. (2013). Eye tracking in early autism research. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, 5(1), 28. <https://doi.org/10.1186/1866-1955-5-28>
- Feng, G. (2011). Eye Tracking: A brief guide for developmental researchers. *Journal of Cognition and Development*, 12(1), 1–11. <https://doi.org/10.1080/15248372.2011.547447>
- Goldberg, H. J., & Wichansky, A. M. (2003). Eye tracking in usability evaluation: A practitioner's guide. In J. Hyönä, R. Radach, & H. Deubel (Eds.), *The mind's eye: Cognitive and applied aspects of eye movement research* (pp. 493–516). Amsterdam: Elsevier Science BV. <https://doi.org/10.1016/B978-044451020-4/50027-X>
- Gredebäck, G., Johnson, S., & von Hofsten, C. (2009). Eye tracking in infancy research. *Developmental Neuropsychology*, 35(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/87565640903325758>
- Hanna, L., Ridsen, K., & Alexander, K. (1997). Guidelines for usability testing with children. *Interactions*, 4(5), 9–14. <https://doi.org/10.1145/264044.264045>
- Hartson, R., & Pyla, P. S. (2012). *The UX Book: Process and guidelines for ensuring a quality user experience*. Waltham, MA: Elsevier.
- Hyönä, J., Lorch Jr., R. F., & Kaakinen, J. K. (2002). Individual differences in reading to summarize expository text: Evidence from eye fixation patterns. *Journal of Educational Psychology*, 94(1), 44–55. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.94.1.44>
- Jarodzka, H., Holmqvist, K., & Gruber, H. (2017). Eye tracking in Educational Science: Theoretical frameworks and research agendas. *Journal of Eye Movement Research*, 10(1), 1–18. <http://dx.doi.org/10.16910/jemr.10.1.3>
- Johansen, S., Hansen, S., Agustin, S., Tall, M., & Skovsgaard, H. (2011, May). Low cost vs. high-end eye tracking for usability testing. In *Proceedings of the 2011 annual conference extended abstracts on Human factors in computing systems - CHI EA '11* (pp. 1177–1182). New York, NY: ACM. <https://doi.org/10.1145/1979742.1979744>
- Johnson, S. P., Slemmer, J. A., & Amso, D. (2004). Where infants look determines how they see: Eye movements and object perception performance in 3-month-olds. *Infancy*, 6(2), 185–201. https://doi.org/10.1207/s15327078in0602_3
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading: From eye fixations to comprehension. *Psychological Review*, 87(4), 329–354. <https://doi.org/10.1037//0033-295x.87.4.329>

- Karamchandani, H., Chau, T., Hobbs, D., & Mumford, L. (2015, November). Development of a low-cost, portable, tablet-based eye tracking system for children with impairments. *Proceedings of the International Convention on Rehabilitation Engineering & Assistive Technology. Singapore Therapeutic, Assistive & Rehabilitative Technologies (START)* (pp. 1-4). Centre. Singapore: START Centre.
- Masood, M., & Thigambaram, M. (2015). The usability of mobile applications for pre-schoolers. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 197, 1818-1826. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.07.241>
- Oakes, L. (2012). Advances in eye tracking in infancy research. *Infancy*, 17(1), 1-8. <https://doi.org/10.1111/j.1532-7078.2011.00101.x>
- Ozcelik, E., Karakus, T., Kursun, E., & Cagiltay, K. (2009). An eye tracking study of how color coding affects multimedia learning. *Computers & Education*, 53(2), 445-453. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2009.03.002>
- Poole, A., & Ball, L. (2006). Eye tracking in HCI and usability research. In C. Ghaoui (Ed.), *Encyclopedia of Human Computer Interaction* (1st ed., pp. 211-219). Hershey, PA: Idea Group. <https://doi.org/10.4018/978-1-59140-562-7.ch034>
- Read, J. (2015). Children as participants in design and evaluation. *Interactions*, 22(2), 64-66. <https://doi.org/10.1145/2735710>
- Sasson, N., & Elison, J. (2012). Eye tracking young children with autism. *Journal of Visualized Experiments*, 61, e3675. <https://doi.org/10.3791/3675>
- She, H. C., & Chen, Y. Z. (2009). The impact of multimedia effect on science learning: evidence from eye movements. *Computers & Education*, 53(4), 1297-1307. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2009.06.012>
- Sonderegger, A., Schmutz, S., & Sauer, J. (2016). The influence of age in usability testing. *Applied Ergonomics*, 52, 291-300. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.06.012>
- Tsai, M., Hou, H., Lai, M., Liu, W., & Yang, F. (2012). Visual attention for solving multiple-choice science problem: An eye tracking analysis. *Computers & Education* 58(1), 375-385. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.07.012>
- Wipfli, R. (2008). *Sequential display of diagrams: How does it affect exploration and memorization?* Master's thesis, University of Geneva, Switzerland.
- Yen, M., & Yang, F. (2015). Methodology and application of eye tracking techniques in science education. In M. H. Chiu (Ed.), *Science Education Research and Practices in Taiwan* (pp. 249-277). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-287-472-6_13