

**HEC MONTRÉAL**

**Effets de la gestuelle en contexte d'utilisation d'un produit éducatif  
numérique pour enfants**

**Par**

**Marie-Laure Di Fabio-Becker**

**Sciences de la gestion  
(Option Marketing)**

*Mémoire présenté en vue de l'obtention  
du grade de maîtrise ès sciences en gestion  
(M. Sc.)*

Décembre 2016  
© Marie-Laure Di Fabio, 2016

## Sommaire

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, affective 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 (Read et Markopoulos, 2013), bien que cette variable soit considérablement liée à l'apprentissage des enfants dans divers domaines: apprentissage des langues (Mavilidi *et al.*, 2015; McNeill, 2000) ou des mathématiques (Martha W Alibali *et al.*, 2014; Martha Wagner Alibali et DiRusso, 1999). Ce mémoire vise donc à étudier l'importance de la gestuelle (spécifiquement les mouvements des mains) quant à son impact direct sur la charge cognitive et la performance de l'enfant, tout en considérant ses effets modérateurs dans un contexte de résolution mathématique sur tablette numérique.

Pour ce faire, nous contrôlons la difficulté de questions mathématiques à résoudre par l'apprenant. Une observation non participante nous permet de relever les comportements de l'enfant, et d'obtenir les mesures liées à la gestuelle : présence de l'événement (pointer ou compter), interruption lors du dénombrement, et durée du dénombrement. La charge cognitive de l'enfant est saisie de manière oculométrique, nous révélant moyenne et écart-type pupillaires. Enfin, la performance de l'apprenant est évaluée grâce au score obtenu par l'enfant (bonne ou mauvaise réponse à la question posée).

Nos résultats suggèrent que l'utilisation des doigts pour pointer ou compter, de même que l'interruption lors du dénombrement, n'impactent en rien la moyenne pupillaire, mais impactent négativement l'écart-type pupillaire de l'apprenant (H3). De plus, nos mesures comportementales liées à la gestuelle n'impactent pas la performance de l'enfant, à une exception près : l'interruption lors du dénombrement réduit la performance de l'utilisateur (H4). Quant aux effets modérateurs des variables comportementales étudiées, ces dernières modèrent à la baisse l'impact de la difficulté de la tâche sur l'écart-type pupillaire, quand l'interruption vient renforcer l'effet de la difficulté sur la moyenne pupillaire (H5). Enfin, l'impact de la charge cognitive sur la performance de l'étudiant n'est que faiblement affecté par la dimension comportementale de notre étude; l'interruption tend à renforcer la relation négative écart-type pupillaire/performance (H6). Notre étude confirme que la difficulté d'une question a un effet positif sur la charge cognitive de l'apprenant, plus précisément sur la moyenne pupillaire (H1). Enfin, la charge cognitive n'est pas négativement liée à la performance de l'apprenant (H2).

Mots-clés: «gesture», «cognitive load», «hand movements», «E- learning», «Child Computer Interaction»

# Table des matières

<b>1</b>	<b>CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE</b>	<b>10</b>
<b>1.1</b>	<b>LA COGNITION</b>	<b>10</b>
1.1.1	CATÉGORIES DE CONNAISSANCES	10
1.1.2	LA CHARGE COGNITIVE	11
1.1.3	TYPOLOGIE DE LA CHARGE COGNITIVE	13
1.1.4	PRINCIPES COGNITIFS LIÉS À L'APPRENTISSAGE	15
<b>1.2</b>	<b>LA GESTUELLE DANS UN CONTEXTE D'APPRENTISSAGE</b>	<b>21</b>
1.2.1	CE QUE LA GESTUELLE RÉVÈLE DU NIVEAU DE COMPRÉHENSION D'UN APPRENANT	22
1.2.2	GESTUELLE ET PERFORMANCE	24
1.2.3	COMMENT LA GESTUELLE FAVORISE-T-ELLE L'APPRENTISSAGE?	25
1.2.4	GESTES APPARENTÉS À L'APPRENTISSAGE	27
<b>2</b>	<b>CHAPITRE 2 : CADRE CONCEPTUEL</b>	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE</b>	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>DESIGN EXPÉRIMENTAL</b>	<b>32</b>
<b>3.2</b>	<b>STIMULI EXPÉRIMENTAUX</b>	<b>33</b>
<b>3.3</b>	<b>COLLECTE DES DONNÉES</b>	<b>34</b>
<b>3.4</b>	<b>PARTICIPANTS</b>	<b>35</b>
3.4.1	RECRUTEMENT	35
3.4.2	CRITÈRES D'EXCLUSION	35
3.4.3	PROFIL DES PARTICIPANTS	36
<b>3.5</b>	<b>MESURES ET INSTRUMENTATION</b>	<b>36</b>
3.5.1	CHARGE COGNITIVE	37
3.5.2	GESTUELLE	38
3.5.3	DIFFICULTÉ DE LA TÂCHE	39
3.5.4	PERFORMANCE	40
<b>3.6</b>	<b>TRANSFORMATIONS DE VARIABLES PRÉLIMINAIRES À NOS ANALYSES</b>	<b>40</b>
3.6.1	ÉCART-TYPE DU DIAMÈTRE PUPILLAIRE («ÉCART-TYPE_PUPILLAIRE»)	40
3.6.2	NOMBRE DE POINTAGES DU DOIGT («NOMBRE_POINTAGES»)	41
3.6.3	DURÉE DU DÉNOMBREMENT («DUREE_COMPTER»)	41
<b>3.7</b>	<b>VARIABLES STATISTIQUES UTILISÉES POUR NOS ANALYSES</b>	<b>42</b>
<b>3.8</b>	<b>STRATÉGIE D'ANALYSE</b>	<b>44</b>
3.8.1	TESTS DES EFFETS DIRECTS DE NOTRE MODÈLE	44
3.8.2	TESTS DES EFFETS MODÉRATEURS DE NOTRE MODÈLE	45
<b>4</b>	<b>CHAPITRE 4 : ANALYSE DES RÉSULTATS</b>	<b>47</b>
<b>4.1</b>	<b>STATISTIQUES DESCRIPTIVES</b>	<b>47</b>
<b>4.2</b>	<b>CORRÉLATIONS</b>	<b>51</b>
<b>4.3</b>	<b>RÉGRESSIONS</b>	<b>53</b>

4.3.1	H1 : LA DIFFICULTÉ EST POSITIVEMENT LIÉE À LA CHARGE COGNITIVE DE L'ENFANT DANS UN CONTEXTE D'APPRENTISSAGE SUR TABLETTE NUMÉRIQUE. ....	53
4.3.2	H2 : LA CHARGE COGNITIVE EST NÉGATIVEMENT LIÉE À LA PERFORMANCE DE L'ENFANT DANS UN CONTEXTE D'APPRENTISSAGE SUR TABLETTE NUMÉRIQUE. ....	55
4.3.3	H3 : LA GESTUELLE EST NÉGATIVEMENT LIÉE À LA CHARGE COGNITIVE DE L'ENFANT DANS UN CONTEXTE D'APPRENTISSAGE SUR TABLETTE NUMÉRIQUE. ....	56
4.3.4	H4 : LA GESTUELLE EST POSITIVEMENT LIÉE À LA PERFORMANCE DE L'ENFANT DANS UN CONTEXTE D'APPRENTISSAGE SUR TABLETTE NUMÉRIQUE. ....	60
4.3.5	H5 : L'UTILISATION DE LA GESTUELLE DIMINUERA L'IMPACT DE LA DIFFICULTÉ SUR LA CHARGE COGNITIVE DE L'ENFANT DANS UN CONTEXTE D'APPRENTISSAGE SUR TABLETTE NUMÉRIQUE.....	62
4.3.6	H6 : L'UTILISATION DE LA GESTUELLE DIMINUERA L'IMPACT DE LA CHARGE COGNITIVE SUR LA PERFORMANCE DE L'ENFANT DANS UN CONTEXTE D'APPRENTISSAGE SUR TABLETTE NUMÉRIQUE. ....	81
4.3.7	SYNTHÈSE DES RÉSULTATS .....	87
<b>5</b>	<b><u>CHAPITRE 5 : DISCUSSION DES RÉSULTATS.....</u></b>	<b>92</b>
<b>6</b>	<b><u>CHAPITRE 6 : CONCLUSION .....</u></b>	<b>95</b>
<b>6.1</b>	<b>CONTRIBUTIONS THÉORIQUES.....</b>	<b>95</b>
<b>6.2</b>	<b>IMPLICATIONS MANAGÉRIALES.....</b>	<b>96</b>
<b>6.3</b>	<b>LIMITES DE LA RECHERCHE ET AVENUES DE RECHERCHES FUTURES .....</b>	<b>98</b>
<b>6.4</b>	<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>100</b>
<b>7</b>	<b><u>BIBLIOGRAPHIE.....</u></b>	<b>101</b>
<b>8</b>	<b><u>ANNEXES .....</u></b>	<b>108</b>

## Liste des tableaux

TABLEAU 1 – HYPOTHÈSES DE NOTRE ÉTUDE .....	31
TABLEAU 2 – CATÉGORISATION DES TECHNIQUES DE MESURE DE CHARGE COGNITIVE .....	37
TABLEAU 3 – MESURES UTILISÉES POUR L'ÉTUDE DE LA GESTUELLE .....	39
TABLEAU 4 - PRÉSENTATION DES MESURES ASSOCIÉES AUX CONCEPTS DU MODÈLE.....	43
TABLEAU 5 - STRATÉGIE D'ANALYSE DES EFFETS MODÉRATEURS DANS LE CADRE DE CE MÉMOIRE .....	45
TABLEAU 6 – ANALYSE « FINE » - MATRICE D'ANALYSE DES EFFETS MODÉRATEURS .....	46
TABLEAU 7 - STRATÉGIE D'ANALYSE DES EFFETS MODÉRATEURS DE H5.....	46
TABLEAU 8 – TABLEAU DE FRÉQUENCES RELATIVES AU NOMBRE DE POINTAGES .....	48
TABLEAU 9 - TABLEAU DE FRÉQUENCES DU NOMBRE DE SUJETS AYANT POINTÉ POUR QUELLE QUESTION .	48
TABLEAU 10 - STATISTIQUES DESCRIPTIVES DE NOS RÉSULTATS (PREMIÈRE PARTIE).....	50
TABLEAU 11 – STATISTIQUES DESCRIPTIVES DE NOS RÉSULTATS (DEUXIÈME PARTIE) .....	50
TABLEAU 12 - MATRICE DE CORRÉLATION DES RÉSULTATS DE NOTRE ÉTUDE.....	52
TABLEAU 13 – MATRICE D'ANALYSE DES RÉSULTATS .....	63
TABLEAU 14 - SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE NOTRE ÉTUDE .....	90

## Liste des tableaux de résultats

TABLEAU DES RÉSULTATS 1 – EFFETS DE LA DIFFICULTÉ, DE L’ACTION DE POINTER ET DE L’ACTION DE COMPTER SUR LA MOYENNE PUPILLAIRE. ....	53
TABLEAU DES RÉSULTATS 2 - EFFETS DE LA DIFFICULTÉ, DE L’ACTION DE POINTER ET DE L’ACTION DE COMPTER SUR L’ÉCART-TYPE PUPILLAIRE .....	54
TABLEAU DES RÉSULTATS 3 - EFFETS DE LA MOYENNE PUPILLAIRE, DE L’ACTION DE POINTER ET DE L’ACTION DE COMPTER SUR LA PERFORMANCE .....	55
TABLEAU DES RÉSULTATS 4 - EFFET DE L’ÉCART-TYPE PUPILLAIRE SUR LA PERFORMANCE.....	55
TABLEAU DES RÉSULTATS 5 - EFFETS DE L’INTERRUPTION LORS DU DÉCOMPTE SUR LA MOYENNE PUPILLAIRE.....	57
TABLEAU DES RÉSULTATS 6 – EFFETS DE LA DURÉE DU DÉNOMBREMENT SUR LA MOYENNE PUPILLAIRE....	57
TABLEAU DES RÉSULTATS 7 - EFFET DE L’INTERRUPTION LORS DU DÉNOMBREMENT SUR L’ÉCART-TYPE PUPILLAIRE.....	58
TABLEAU DES RÉSULTATS 8 - EFFETS DE LA DURÉE DU DÉNOMBREMENT SUR L’ÉCART-TYPE PUPILLAIRE ....	59
TABLEAU DES RÉSULTATS 9 - EFFETS DE L’INTERRUPTION LORS DU DÉNOMBREMENT SUR LA PERFORMANCE .....	61
TABLEAU DES RÉSULTATS 10 - EFFETS DE LA DURÉE DU DÉNOMBREMENT SUR LA PERFORMANCE .....	61
TABLEAU DES RÉSULTATS 11 - TESTS EFFET MODÉRATEUR DE L’ACTION DE POINTER SUR LA RELATION DIFFICULTÉ-MOYENNE PUPILLAIRE .....	64
TABLEAU DES RÉSULTATS 12 - TESTS EFFET MODÉRATEUR DE L’ACTION DE COMPTER SUR LA RELATION DIFFICULTÉ-MOYENNE PUPILLAIRE .....	66
TABLEAU DES RÉSULTATS 13 – TESTS EFFET MODÉRATEUR DE L’INTERRUPTION LORS DU DÉNOMBREMENT SUR LA RELATION DIFFICULTÉ-MOYENNE PUPILLAIRE .....	68
TABLEAU DES RÉSULTATS 14 - EFFET MODÉRATEUR DE LA DURÉE DE DÉNOMBREMENT SUR LA RELATION DIFFICULTÉ-MOYENNE PUPILLAIRE .....	71
TABLEAU DES RÉSULTATS 15 – TESTS EFFET MODÉRATEUR DE L’ACTION DE POINTER SUR LA RELATION DIFFICULTÉ-ÉCART-TYPE PUPILLAIRE.....	72
TABLEAU DES RÉSULTATS 16 – TESTS EFFET MODÉRATEUR DE L’ACTION DE COMPTER SUR LA RELATION DIFFICULTÉ-ÉCART-TYPE PUPILLAIRE.....	74
TABLEAU DES RÉSULTATS 17 – TESTS EFFET MODÉRATEUR DE L’INTERRUPTION LORS DU DÉNOMBREMENT SUR LA RELATION DIFFICULTÉ-ÉCART-TYPE PUPILLAIRE .....	77
TABLEAU DES RÉSULTATS 18 - EFFET MODÉRATEUR DE L’INTERRUPTION LORS DU DÉNOMBREMENT SUR LA RELATION DIFFICULTÉ-ÉCART-TYPE PUPILLAIRE.....	80
TABLEAU DES RÉSULTATS 19 - EFFETS MODÉRATEURS DE L’ACTION DE POINTER ET L’ACTION DE COMPTER SUR LA RELATION MOYENNE PUPILLAIRE-PERFORMANCE .....	82
TABLEAU DES RÉSULTATS 20 - EFFET MODÉRATEUR DE L’INTERRUPTION LORS DU DÉNOMBREMENT SUR LA RELATION MOYENNE PUPILLAIRE-PERFORMANCE. ....	83
TABLEAU DES RÉSULTATS 21 - EFFET MODÉRATEUR DE LA DURÉE DU DÉNOMBREMENT SUR LA RELATION MOYENNE PUPILLAIRE-PERFORMANCE.....	84
TABLEAU DES RÉSULTATS 22 - EFFETS MODÉRATEURS DE L’ACTION DE POINTER ET DE L’ACTION DE COMPTER SUR LA RELATION ÉCART-TYPE PUPILLAIRE-PERFORMANCE. ....	85
TABLEAU DES RÉSULTATS 23 - EFFET MODÉRATEUR DE L’INTERRUPTION LORS DU DÉNOMBREMENT SUR LA RELATION ÉCART-TYPE PUPILLAIRE-PERFORMANCE.....	86
TABLEAU DES RÉSULTATS 24 - EFFET MODÉRATEUR DE LA DURÉE DU DÉNOMBREMENT SUR LA RELATION ÉCART-TYPE PUPILLAIRE-PERFORMANCE .....	86

## Liste des figures

FIGURE 1 - ILLUSTRATION DU CARACTÈRE FLUCTUANT DE LA CHARGE COGNITIVE .....	12
FIGURE 2 - PRÉSENTATION DE DONNÉES SELON UN «FORMAT INTÉGRÉ» OU UN «SPLIT ATTENTION FORMAT».....	17
FIGURE 3 – MODÉLISATION DE NOS HYPOTHÈSES.....	30
FIGURE 4 – DESIGN EXPÉRIMENTAL DE NOTRE ÉTUDE .....	32
FIGURE 6 - ANALYSE «CLASSIQUE» EN CONTEXTE DE RÉGRESSION EN MESURES RÉPÉTÉES .....	45
FIGURE 7 – SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L’HYPOTHÈSE 1 (H1).....	54
FIGURE 8 - SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L’HYPOTHÈSE 2 (H2).....	56
FIGURE 9 - SYNTHÈSE RÉSULTATS DE L’HYPOTHÈSE 3 (H3).....	60
FIGURE 10 - SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L’HYPOTHÈSE 4 (H4).....	62
FIGURE 11 – H5 : SYNTHÈSE DES EFFETS MODÉRATEURS DE NOS MESURES DE GESTUELLE SUR LA RELATION ENTRE DIFFICULTÉ ET CHARGE COGNITIVE .....	63
FIGURE 12 – H5 : GRAPHIQUE - EFFET MODÉRATEUR DE L’INTERRUPTION LORS DU DÉNOMBREMENT SUR LA MOYENNE PUPILLAIRE .....	70
FIGURE 13 – H5 : GRAPHIQUE – EFFET MODÉRATEUR DU DÉNOMBREMENT («COMPTER») SUR L’ÉCART-TYPE DU DIAMÈTRE PUPILLAIRE .....	76
FIGURE 14 – H5 : GRAPHIQUE – EFFET MODÉRATEUR DE L’INTERRUPTION LORS DU DÉNOMBREMENT («INTERRUPTION_COMPTER») SUR L’ÉCART-TYPE DU DIAMÈTRE PUPILLAIRE. ....	79
FIGURE 15 – H6 : SYNTHÈSE DES EFFETS MODÉRATEURS DE NOS MESURES DE GESTUELLE SUR LA RELATION ENTRE CHARGE COGNITIVE ET PERFORMANCE.....	81
FIGURE 16 - SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE NOTRE ÉTUDE (FORME MODÉLISÉE) .....	87

## Liste des équations

ÉQUATION 1 - ADDITIVITÉ DES CHARGES COGNITIVES .....	13
ÉQUATION 2- ILLUSTRATION DU «WORKED EXAMPLE» .....	19

## Liste des abréviations

CC : Charge cognitive  
CCI: «*Child-Computer Interaction*»  
CER : Comité d’Éthique de la Recherche  
CLT: «*Cognitive Load Theory*»  
HCI : «*Human-Computer Interaction*»  
IEM : Interaction Enfant-Machine  
PC : «*Personal Computer*»  
UX : «*User experience*»

## Remerciements

“Un travail constant vient à bout de tout.” Virgile.

Je tiens à remercier mes directeurs de mémoire, Monsieur Sylvain Sénécal et Monsieur Pierre-Majorique Léger pour leurs conseils éclairés et leur bienveillance, sans qui je n’aurais pu remettre un travail aussi rigoureux et abouti.

Par ailleurs, je tiens à remercier toute l’équipe du Tech3Lab, dont Brendan et Vanessa, m’ayant permis d’accéder à des outils hors pair et d’obtenir une qualité de données à laquelle je n’aurais pu prétendre.

Sans oublier, bien évidemment, Monsieur Carl St Pierre, à l’incroyable gentillesse, fin pédagogue armé de patience pour accompagner au mieux les étudiants.

Je tiens également à remercier d’autres professeurs ayant marqué mon cursus académique. Tout d’abord madame Yannik St James, professeure passionnée par sa matière, charismatique, femme de parole faisant preuve de beaucoup de compassion. Je tiens à vous remercier sincèrement pour la qualité de votre enseignement et vos remarquables qualités humaines, Madame St James.

J’ai la chance d’avoir été, par ailleurs, assistante de recherche de Monsieur Sénécal. Je tenais à vous remercier chaleureusement pour votre soutien (et non des moindres), vos conseils, votre confiance et votre bienveillance.

Un immense merci à Monsieur et Madame Loveland, anciens professeurs d’HEC Montréal, ayant indubitablement cru en mes compétences et m’ayant laissé entrevoir de radieux horizons au moment où le besoin s’en faisait ressentir. Je vous remercie sincèrement pour votre confiance, vos encouragements et garderai un souvenir chargé de sympathie et de reconnaissance à votre égard.

Je tiens par ailleurs à remercier ma mère, qui m’a transmis cet «instinct de survie» et cette force de caractère, pour qui tout est possible. Mon père, qui m’a soutenu et insufflé les ressources nécessaires pour avancer aussi loin que mes capacités le permettaient. Je suis extrêmement chanceuse d’avoir pu compter sur vous, suis fière de vous compter dans ma vie, et vous suis reconnaissante de l’amour et de l’éducation que vous m’avez transmis; tendre pensée pour ma grand-mère.

À ma sœur Carole et mon adorable nièce, Éléonore, qui comblent nos vies en les rendant douces et légères; je vous aime.

Enfin, aimer savoir est humain, savoir aimer est divin. Je choie et chéris une perle, véritable, chaude larme d’Aphrodite. Merci, Quentin, d’être présent à mes côtés.

## Introduction

Bon nombre de recherches ayant trait à l'expérience de l'utilisateur (UX) sont mises à contribution pour développer des produits numériques de qualité, répondant aux attentes de leurs usagers (Hartson et Pyla, 2012; Zahidi, Lim et Woods, 2014). Des concepts tels que l'ergonomie, la facilité d'utilisation, la maintenance, ou le design sont alors abordés, et ce, dans différents secteurs d'activité : divertissement (Burke *et al.*, 2006), communications (Stenning et Gurr, 1997), commerce (Luarn et Lin, 2005) ou enseignement (Sharples, 2000).

Les enfants sont sollicités pour co-développer (Antle *et al.*, 2011) et évaluer les produits. En effet, ces derniers sont désignés comme étant des utilisateurs à fort potentiel, au vu de leur familiarité et de l'usage aisé des appareils électroniques inhérents à leur environnement (Read et Markopoulos, 2013). Les enfants sont désormais non seulement utilisateurs, mais aussi propriétaires de PC, jeux vidéo, téléphones intelligents, etc. (Dutta et Mia, 2011). Cette importante exposition contribue largement à la prise de conscience collective quant à l'impérieuse nécessité de s'assurer de la qualité et de la convenance des produits leur étant destinés sur le marché, qui plus est lorsque ces derniers sont éducatifs.

De nouveaux outils numériques se développent afin de pallier des besoins pédagogiques croissants (Colombo, Landoni et Rubegni, 2012; Price et Falcão, 2011), faisant intervenir, de ce fait, l'usage des technologies dans un contexte académique; on parle d'ailleurs de «E-learning», incluant l'apprentissage sur tablette, écrans tactiles, et «e-books».

Une majeure partie des études ayant trait à l'interaction enfant-machine (IEM) vise à nous renseigner sur l'usage des technologies dans un contexte d'apprentissage numérique. Ces études tentent de répondre à des questions telles que : comment intégrer de manière efficace les technologies au sein d'un cours conduit en classe (Cuendet *et al.*, 2015), en quoi l'usage des «e-book» rendrait l'enseignement personnalisé et adapté à l'étudiant (Huang *et al.*, 2012), comment l'utilisation de jeux vidéo éducatifs peut améliorer la performance de l'apprenant (Durkin *et al.*, 2015; Sung, Hwang et Yen, 2015), quel est le rôle de l'iPad quant à l'éveil de l'enfant en bas âge (Price, Jewitt et Crescenzi, 2015), etc.

Cependant, bien que les recherches antérieures dans le domaine des IEM aient étudié de manière exhaustive le phénomène de l'apprentissage des enfants dans un environnement numérique, certains facteurs restent inabordés. 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.

En effet, il a largement été démontré que la gestuelle avait 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; Raedy Ping et Goldin-Meadow, 2010), tout en contribuant à la réussite scolaire des enfants (Tomporowski *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, 2013).

Ce mémoire 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 l'expérience «autour» de la tablette, et non pas seulement à l'interaction enfant-machine. La dimension comportementale de l'expérience utilisateur de l'enfant pourrait alors être exploitée afin de développer des applications pédagogiques de meilleure qualité.

Ce mémoire se présente de la manière suivante. Dans un premier temps, nous présenterons une revue de la littérature relative à 1) la cognition et ses mécanismes cognitifs d'apprentissage, ainsi qu'à 2) la gestuelle et son impact cognitif sur le développement d'un enfant (Chapitre 1). Dans un second temps, nous présenterons le cadre conceptuel et les hypothèses de cette recherche (Chapitre 2). Dans un troisième temps, nous exposerons la méthodologie utilisée pour conduire notre étude, en revenant notamment sur le design expérimental, les stimuli, le processus de collecte des données, ainsi que les instruments de mesure utilisés dans le cadre de cette recherche (Chapitre 3). Dans un quatrième temps, nous effectuerons l'analyse de nos résultats et tenterons de vérifier de nos hypothèses de recherche (Chapitre 4). Enfin, nous conclurons ce mémoire par la discussion des résultats, les contributions et les limites de cette recherche, pour finalement aborder les avenues de recherches futures.

# 1 Chapitre 1 : Revue de Littérature

Dans cette section, nous nous intéresserons aux résultats des recherches antérieures ayant trait à notre problématique de recherche. Il s'agira donc de définir la charge cognitive, de synthétiser et de s'appropriier les recherches antérieures documentant le sujet, tout en veillant à les lier à l'apprentissage. Les stratégies de réduction (ou d'augmentation) de la charge cognitive vous seront ensuite présentées. Nous nous attarderons finalement sur l'une d'entre elles, la gestuelle, concept plus exhaustivement développé dans une seconde section. Cette seconde section nous permettra de comprendre les différents mécanismes permettant l'accroissement des ressources mentales disponibles pour l'enfant, le lien existant entre gestuelle et performance d'un enfant et abordera finalement les gestes précis catalysant le phénomène d'apprentissage.

## 1.1 La cognition

### 1.1.1 Catégories de connaissances

Il est tout d'abord nécessaire de comprendre que différents types de connaissances peuvent être acquises, intégrées et traitées de différentes manières, d'un point de vue cognitif (Sweller, Ayres et Kalyuga, 2011). Au vu de notre contexte d'analyse, c.-à-d. la résolution de problèmes mathématiques, on peut en effet souligner la distinction entre les connaissances biologiques primaires («biologically primary knowledge») et secondaires («biologically secondary knowledge»), modèle élaboré par David C Geary (2008), dont une majeure partie des recherches porte sur le développement cognitif de l'enfant. Selon l'auteur, le développement cognitif ainsi que le parcours académique d'un enfant dépendent de capacités cérébrales biologiques et d'influences culturelles (David C. Geary, 1995).

Les connaissances biologiques primaires sont issues d'un héritage génétique et biologique. Ces compétences sont universelles et acquises sans effort conscient de la part du sujet (Sweller, Ayres et Kalyuga, 2011). À titre d'exemple, l'on pourrait citer l'apprentissage de sa langue maternelle (parler et comprendre) ou la reconnaissance des formes (rond, carré, cercle ...).

À l'inverse, les connaissances biologiques secondaires correspondent au bagage de connaissances nécessaires pour s'intégrer au sein de nos sociétés contemporaines. En effet, les institutions culturelles, telles que les universités et les écoles, ont été conçues pour soutenir un long et fastidieux apprentissage. Ce processus d'intégration du contenu instruit est fait de manière consciente et délibérée par l'apprenant. Ainsi, «l'acquisition d'une expertise musicale, sportive, ou académique

(systèmes d'écriture et mathématiques) requiert un entraînement régulier et soutenu » (David C. Geary, 1995 : 27, traduction libre). Sweller, Ayres et Kalyuga (2011 : 51) reprennent les termes de l'auteur, en qualifiant ce type de connaissances comme étant enseignables («*teachable*»).

En somme, nos institutions et professeurs transmettent des connaissances que l'on peut désormais qualifier de connaissances biologiques secondaires, difficilement appréhendables sans instructions et transmissions conscientes, reposant sur des connaissances primaires (F. Pass & Sweller, 2012, cité dans Mavilidi *et al.*, 2015). À titre de précision, donc, l'on fait référence aux connaissances biologiques secondaires dans le cadre de cette recherche.

### 1.1.2 La charge cognitive

La théorie de la charge cognitive («*cognitive load theory*») se révèle être l'une des théories fondamentales en psychologie lorsque l'on aborde la cognition dans un contexte d'apprentissage, y compris apprentissage numérique (e-learning) (Lang, 2007; Sweller, Ayres et Kalyuga, 2011).

Selon Fred Paas, Renkl et Sweller (2003 : 2), «*by simultaneously considering the structure of information and the cognitive architecture that allows learners to process that information, cognitive load theorists have been able to generate a unique variety of new and sometimes counterintuitive instructional designs and procedures*». Sweller, Ayres et Kalyuga (2011 : 42, traduction libre) affirment que «*la résolution de problèmes est permise par un réseau de schémas, particulièrement bien organisé et étoffé, contenu par la mémoire à long terme.*» La mémoire de travail («*working memory*»), qui se trouve être de court terme, 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.

S'il s'avérait que la quantité d'informations à traiter par l'apprenant était supérieure à ce seuil maximal d'assimilation et de stockage court terme, la charge cognitive demeurerait trop élevée, la mémoire de travail serait surchargée, entraînant ainsi une mauvaise intégration à long terme du contenu, et induirait par conséquent une mauvaise performance de l'apprenant (Sweller, 1988). A contrario, une régulation de la charge cognitive à la baisse tend à favoriser le phénomène d'apprentissage chez l'individu grâce à une série de stratégies et principes liés à la cognition (section 1.1.4). De là,

***Hypothèse : La charge cognitive est négativement liée à la performance de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.***

Ce phénomène est à considérer d'autant plus sérieusement dans le cas où le sujet serait un enfant. En effet, un enfant âgé de 8 ans retiendra en moyenne deux fois moins d'informations qu'un adulte, pour un même contenu présenté aux deux sujets (Kharitonova, Winter et Sheridan, 2015). Autrement dit, la mémoire de travail des enfants (5 à 8 ans) est deux fois moins élevée que celle des adultes. En effet, l'étude conduite par O'Hare *et al.* (2008) stipule que l'on observe une activation moindre des régions cérébrales sollicitées lors d'activité de mémorisation chez les enfants, par rapport aux adultes. Par ailleurs, il s'avère que le nombre d'activations de ces régions croît avec l'âge des sujets (O'Hare *et al.*, 2008). Il s'agira 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.

Par ailleurs, Xie et Salvendy (2000) considèrent que la charge cognitive fluctue dans le temps, n'est pas constante. La figure 1 illustre la temporalité du concept : ce dernier affiche une moyenne, des pics, tandis que cette charge s'accumule dans le temps. On veillera donc à considérer la moyenne ainsi que la dimension fluctuante de cette variable dans le cadre de ce mémoire.

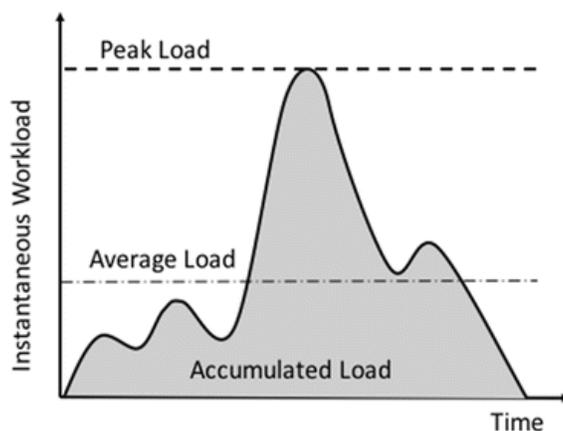


Figure 1 - Illustration du caractère fluctuant de la charge cognitive

Source : Mirhoseini, Léger et Sénécal (2017)

Enfin, il est nécessaire de distinguer plusieurs types de charges mentales aux caractéristiques bien différentes. Celles-ci sont présentées dans la section suivante.

### 1.1.3 Typologie de la charge cognitive

Selon Fred Paas, Renkl et Sweller (2003 : 2), 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.

Charge cognitive intrinsèque + Charge cognitive extrinsèque + Charge cognitive Germane < Mémoire de travail («Working Memory»)

#### Équation 1 - Additivité des charges cognitives

Si cette somme de charges se voyait excédentaire à la capacité maximale de mémoire de travail, nous trouverions en situation de surcharge cognitive («*cognitive overload*»), nuisant fortement à l'apprentissage du sujet : erreurs orthographiques, de syntaxe ... (Fayol, Largy et Lemaire, 1994). Ainsi, chercheurs, pédagogues et designers tentent de concevoir et utiliser des produits et méthodes de réduction de cette charge cognitive, afin de favoriser l'apprentissage des enfants.

#### 1.1.3.1 Charge cognitive intrinsèque

La première charge cognitive, charge intrinsèque («intrinsic cognitive load»), est inhérente à la structure et à la complexité de la tâche (Pollock, Chandler et Sweller, 2002 : 62). Le degré de complexité du contenu dépend du nombre et du degré d'interaction auprès des éléments à traiter. En d'autres termes, «une tâche sera jugée de 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 : 52, 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'interactivité («interactivity») avec les éléments à traiter, amoindrira cette charge mentale (Fred Paas, Renkl et Sweller, 2003). De là,

**Hypothèse : La difficulté est positivement liée à la charge cognitive de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.** (L'on pourrait même spécifier qu'il s'agit d'un effet sur la charge cognitive intrinsèque.)

#### 1.1.3.2 Charge cognitive extrinsèque

La charge extrinsèque («Extraneous Cognitive Load») est, quant à elle, directement liée au format ainsi qu'à la manière dont l'information est présentée (Cooper et Sweller, 1987; Sweller, Ayres et Kalyuga, 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, à même de la diminuer en offrant au répondant (ou utilisateur dans un contexte UX) 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 (c.-à-d., quand une partie A fait référence à une partie B sans mentionner où se trouve cette dernière section), sera vecteur d'augmentation de la charge cognitive extrinsèque puisque les ressources mobilisées pour cette tâche ne contribuent d'aucune sorte à l'assimilation de contenu (Fred Paas, Renkl et Sweller, 2003 : 2, traduction libre ). Celle-ci doit, par conséquent, être minimisée par le chercheur (Cooper et Sweller, 1987; Sweller, Ayres et Kalyuga, 2011).

Ceci est d'autant plus vrai lorsque la charge intrinsèque est élevée, puisque l'on rappelle que les deux catégories de charges s'additionnent et sont contraintes par la capacité maximale de la mémoire de travail (Fred Paas, Renkl et Sweller, 2003).

### ***1.1.3.3 « Germane cognitive load » ou charge essentielle***

Lorsque la charge cognitive intrinsèque ne mobilise pas l'intégralité des ressources cognitives de l'individu, l'apprenant peut «invest extra effort in processes that are directly relevant to learning, such as schema construction. These processes also increase cognitive load, but it is germane cognitive load that contributes to, rather than interferes with, learning» (Sweller, van Merriënboer et Paas, 1998 : 264).

À l'inverse de la charge cognitive intrinsèque, et tout comme la charge cognitive extrinsèque, la charge cognitive germane, ou essentielle, est manipulable par le concepteur. À un élément près : la charge extrinsèque nuit à l'apprentissage lorsque celle-ci se voit élevée, tandis que ce dernier type de charge mentale favorise l'intégration de nouveaux éléments, et doit donc être revue à la hausse dans la mesure du possible (Fred Paas, Renkl et Sweller, 2003).

En effet, celle-ci fait référence aux ressources dédiées à la création de schémas d'apprentissage et d'automatismes liés à la tâche (Fred Paas et Van Gog, 2006). Ces schémas, véritables construits

cognitifs, 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.

Enfin, de récentes études ne cessent de critiquer son appellation. Selon Sweller, Ayres et Kalyuga (2011 : 57) : «it is probably inappropriate to use this term» because «unlike intrinsic and extraneous cognitive load [...], germane cognitive load is not imposed by the learning materials». Les auteurs suggèrent qu'il faudrait plutôt parler de ressources germanes qui doivent être suffisamment élevées pour répondre à l'intensité de la charge intrinsèque induite par le contenu à traiter.

Pour résumer, tâchons de garder à l'esprit que la somme des trois catégories de charge cognitive ne doit pas excéder les ressources associées à la mémoire de travail («working memory»). De plus, la charge cognitive intrinsèque est irrépessible, à moins de tronquer la quantité d'informations intrinsèques à la tâche. À une période  $t$ , 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 construits.

À la période  $t+1$ , les schémas intégrés à la fin de la période  $t$  rendent le traitement de la tâche plus facile, diminuant de ce fait la charge intrinsèque. Ce nouveau dégagement de ressources, permet d'en allouer davantage aux deux autres charges, dont la charge germane, davantage mobilisée, permettant l'apprentissage, et réduisant de ce fait la charge intrinsèque mobilisée à  $t+2$ , etc. Le phénomène d'apprentissage est donc cyclique, et les connaissances assimilées à  $(t)$  dépendront avant tout du bagage d'informations correctement intégré à la période  $(t-1)$  (Kalyuga *et al.*, 2003).

Enfin, d'un point de vue pédagogique, il a naturellement été question de déceler des stratégies permettant de réduire certains types de charges, ou d'augmenter les ressources mentales disponibles chez l'apprenant. Parallèlement, certains phénomènes cognitifs peuvent nuire à l'acquisition de nouveaux concepts. Il est donc nécessaire que le corps professoral et concepteurs d'applications pédagogiques veillent à maîtriser ces éléments, tout en tenant compte du profil particulier de chaque individu.

Ces stratégies et principes cognitifs liés à l'apprentissage vous sont présentés dans les paragraphes suivants.

#### **1.1.4 Principes cognitifs liés à l'apprentissage**

Les stratégies présentées dans cette section visent à favoriser ou catalyser le phénomène d'apprentissage par différents leviers d'action. De plus, certains effets déviants affectant la résolution

de problèmes seront abordés, et sont directement liés et expliqués par la théorie de la charge cognitive (CTL).

#### 1.1.4.1 «Imagination Effect»

L'imagination est un premier levier sur lequel jouer si l'on veille à optimiser l'apprentissage d'un étudiant. En effet, un groupe A d'étudiants à qui l'on demande d'*imaginer* des concepts ou procédures obtiendra de meilleurs résultats qu'un groupe B d'apprenants répondant à la consigne d'*étudier* les mêmes concepts ou variables. C'est ce que l'on appelle l'**effet d'imagination** (ou «**Imagination effect**») (Cooper *et al.*, 2001; Leahy et Sweller, 2004). Cette théorie se base sur celle de la charge cognitive (CLT). D'après Tiwari et Deore (2009 : 6), «*Cognitive load theory has been used to explain the effect by suggesting that when learners imagine information, they process the relevant schemas in working memory, which facilitates automation*».

En effet, lorsque l'on *imagine* une information, l'on sollicite des schémas déjà connus et stockés dans notre mémoire de travail, ceci favorisant le développement d'automatismes réflexifs de plus long terme.

#### 1.1.4.2 «Expertise Reversal Effect»

Par ailleurs, l'«**Expertise Reversal Effect**» est un principe selon lequel les ressources individuelles disponibles varient d'un apprenant à l'autre. L'expérience et le vécu d'un individu sont, selon cette théorie, des éléments cruciaux lorsqu'il s'agit d'expliquer les différences de performances entre deux sujets (Ericsson et Charness, 1994); de là la catégorisation «*Experts*» vs. «*Novices*». Au vu du nombre conséquent de schémas et construits cognitifs intégrés préalablement, les experts ne nécessitent que peu de ressources à court terme pour traiter de nouvelles informations. Ceux-ci sont donc, la plupart du temps, enclins à obtenir de meilleurs résultats que les novices.

#### 1.1.4.3 «Split Attention Effect»

Cette segmentation, basée sur le bagage de connaissances antérieures de l'apprenant, induit un certain nombre de précautions d'ordre pédagogique. En effet, Mayer et Gallini (1990) conduisirent une série d'études combinant le «**Split Attention Effect**» avec la notion d'expérience de l'apprenant énoncée précédemment.

Par définition, le «*Split-Attention Effect occurs when learners are required to split their attention between at least two sources of information that have been separated either spatially or temporally*».  
(Sweller, Ayres et Kalyuga, 2011 : 111)

Exemple tiré de l'étude conduite par Sweller, Ayres et Kalyuga (2011 : 112)

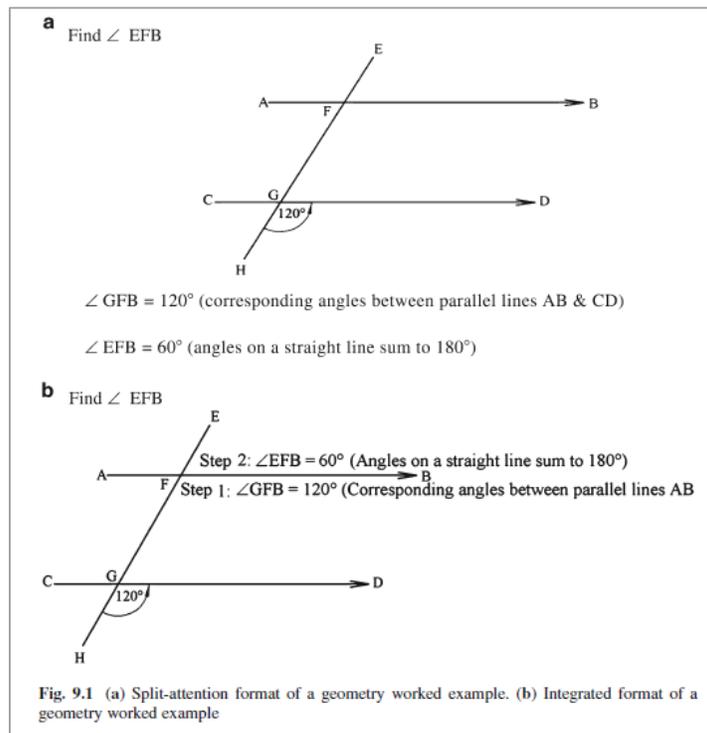


Figure 2 - Présentation de données selon un «format intégré» ou un «Split Attention Format»

Le terme de «Split Attention Effect» est connu pour sa propension à augmenter la charge cognitive extrinsèque de l'apprenant. En effet, la présentation de l'information écrite sous le diagramme (fig. a.) force l'étudiant à opérer des vas et vient entre les deux sources d'information, l'obligeant de ce fait à retenir l'information de la partie complémentaire lorsque celui-ci tente de lier les données. La mémoire de travail est davantage sollicitée qu'elle ne l'est lorsque le problème est présenté de manière intégrée (fig.2 b.). Le «Split Attention Format» devrait donc être évité, pour laisser place au format de présentation intégré.

Or, les résultats de l'étude de Mayer et Gallini (1990) conditionnent cette dernière affirmation, en considérant la variable «expérience» de l'apprenant («Novice/Expert»).

Pour les «novices», la présentation simultanée du contenu visuel et écrit favorisa la résolution du problème. Ceci corrobore les effets présumés du «Split Attention Effect». En revanche, cette

présentation ne favorisa en rien l'acquisition de contenu pour les «experts», et peut même s'avérer nuisible à leur apprentissage.

C'est aussi ce que nous révèle une étude conduite par Kalyuga, Chandler et Sweller (1998), postulant que la plus efficace approche pédagogique destinée aux novices contenait un diagramme accompagné d'un texte explicatif (format intégré), et non une présentation conventionnelle texte-diagramme se suivant consécutivement (format «split attention»). En revanche, la meilleure approche pédagogique destinée aux experts consistait à enlever tout texte explicatif du diagramme, puisque celui-ci était perçu comme redondant («**Redundancy Effect**») et ne faisait qu'accroître la charge cognitive externe, nuisant de ce fait à l'apprentissage de ce segment d'étudiants.

D'autres études soutiennent la théorie selon laquelle certains effets cognitifs peuvent d'abord être maîtrisés, voire éliminés (ex. : précautions de présentation de l'information), pour ensuite croître lorsque l'expertise de l'apprenant augmente (Cooper *et al.*, 2001; Kalyuga *et al.*, 2001). De là, la notion de «Expertise **Reversal Effect**».

#### 1.1.4.4 «Goal-Free Effect»

Le principe du «**Goal-Free Effect**» nous invite à scinder les types de problèmes à résoudre; ceux-ci peuvent conduire l'apprenant à répondre à un but bien précis (ex. : en géométrie : «Mesurez l'angle ABC»), ou peuvent lui laisser davantage de flexibilité dans l'approche de résolution en ne lui conférant pas de but explicite (ex. : «Calculez la valeur d'autant d'angles que vous le pouvez» (Sweller, Ayres et Kalyuga, 2011 : 89). Ce dernier type de problème est nommé «Goal-Free Problem», ou «No-Goal Problem». On parle de «Goal-Free Effect» lorsque des étudiants ayant résolu le «No-Goal Problem» (ex. : «Calculez la valeur d'autant d'angles que vous le pouvez») démontrent un apprentissage plus efficace que les étudiants ayant résolu l'équivalent du problème, posé sous forme de consigne explicitant le but précis de la tâche à résoudre (Sweller, Ayres et Kalyuga, 2011 : 89, traduction libre). En effet, la création d'un environnement n'imposant aucun but particulier permet à l'étudiant de se focaliser sur la situation présente du problème, et sur les moyens d'atteindre une autre étape de raisonnement. L'individu n'est donc pas soumis à une contrainte d'objectif et de moyens pour atteindre cet objectif, ceci se traduisant par une diminution des éléments avec lesquels interagir lors de la résolution du problème (c.-à-d., diminution de la charge intrinsèque). De fait, l'apprenant se trouve devant moult possibilités de résolution du problème, la charge cognitive totale impliquée est elle aussi amoindrie, favorisant l'apprentissage du sujet (Sweller, Ayres et Kalyuga, 2011 : 90). Enfin, ce principe s'applique particulièrement en sciences et lors de problèmes mathématiques.

#### 1.1.4.5 «Worked Example»

Autre élément favorisant l'apprentissage et particulièrement reconnu dans des domaines tels que la musique, les échecs, les programmes sportifs et les mathématiques : le «**Worked Example**» (Atkinson *et al.*, 2000; Lang, 2007).

Par définition, «*worked examples (or worked-out examples) comprise the specification of a problem, the solution steps, and the final solution itself*». (Renkl *et al.*, 1998 : 90)

À titre d'illustration:

Make  $a$  the subject of the equation,  $(a + b) / c = d$ .

Solution

$$(a + b) / c = d$$

$$a + b = dc$$

$$a = dc - b$$

Équation 2- Illustration du «Worked Example»

Source : Sweller, Ayres et Kalyuga (2011 : 99)

Dans ce cas de figure, la solution du problème est présentée pas à pas, de manière détaillée. Cette technique de résolution peut être utilisée de manière efficace et pédagogique lorsqu'il s'agit de fournir l'explication d'un problème complexe (résolu par un expert), à un apprenant plus novice (Atkinson *et al.*, 2000).

Ce développement est d'autant plus remarquable qu'il conduit l'individu à établir des liens entre une situation initiale et tout un cheminement cognitif de résolution associé. L'étudiant sera finalement en mesure d'avoir une vision plus généralisée de certains concepts se rattachant au modèle détaillé retenu (Sweller, Ayres et Kalyuga, 2011). Certaines études démontrent d'ailleurs que l'usage de «Worked Example» favorise davantage l'élaboration de schémas et le transfert de connaissances si on les compare à une résolution plus classique de problèmes équivalents (Renkl *et al.*, 2002). La charge cognitive germane est donc davantage sollicitée, plus particulièrement dans le cadre de certains exercices, tels que la comparaison d'exemples ou l'élaboration d'exemples (Lang, 2007).

#### 1.1.4.6 «Example Comparisons»

Par la comparaison d'exemples («**Example Comparisons**»), c.-à-d., l'identification des similitudes et distinctions entre différents «Worked Examples», l'apprenant peut relever les spécificités pertinentes de chaque problème et exclure le surplus d'information n'ayant pas nécessairement trait au raisonnement (Quilici et Mayer, 1996).

#### 1.1.4.7 «Example Elaborations»

Enfin, l'on entend par élaboration d'exemples («**Example Elaborations**») le fait qu'un étudiant soit en mesure d'élaborer la fin d'un énoncé en se basant sur l'information disponible. Il s'agit, en réalité, de prévenir tout comportement passif issu de l'étude de «Worked examples» en entretenant son implication et sa motivation (Renkl et Atkinson, 2003). Ces deux derniers facteurs impactent positivement la charge germane. Un participant volontaire et engagé pourra donc accroître ses ressources cognitives disponibles, bien que théoriquement limitées (Fred Paas, Renkl et Sweller, 2003).

Un autre facteur impacte fortement à la baisse la demande cognitive de l'apprenant dans un contexte d'apprentissage : la gestuelle.

#### 1.1.4.8 La gestuelle

Certains auteurs vouent également leurs études au rôle de la gestuelle dans un contexte d'apprentissage, et tentent d'expliquer en quoi cette dimension comportementale permet de réduire l'activité mentale associée à une tâche.

L'utilisation de la gestuelle favorise l'assimilation d'informations puisqu'elle permet de réduire la demande cognitive pour effectuer une tâche, ex. parler. En effet, certaines études démontrent *qu'user de ses membres libère des ressources de mémoire de travail* («working memory load»), 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 qu'exprimées verbalement, en mobilisant une dimension visio spatiale et non orale. Cette différence quant au moyen de représenter l'idée enrichit le codage ainsi que le traitement de

l'information («encoding»), 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. Ainsi

***Hypothèse : La gestuelle est négativement liée à la charge cognitive de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.***

De plus, l'on s'attendrait à ce qu'une augmentation de la capacité mémorielle de l'apprenant, lorsque celui-ci use de ses membres, vienne modérer l'effet de difficulté de la tâche à accomplir sur la charge cognitive.

***Hypothèse : L'utilisation de la gestuelle diminuera l'impact de la difficulté sur la charge cognitive de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.***

Enfin, l'étude conduite par Goldin-Meadow *et al.* (2001) corrobore notre propos, en démontrant que les enfants et adultes ayant produit des gestes durant l'expérience conduite ont retenu une plus grande quantité d'informations que leurs pairs respectifs, n'ayant pas usé de la gestuelle, que ce soit ***par choix*** ou répondant à ***la consigne*** leur interdisant d'utiliser leurs membres. En d'autres termes, les participants s'étant servi de la gestuelle afin de retenir l'information présentée démontrèrent une plus grande capacité mémorielle que leurs homologues.

De ce fait, l'on pourrait émettre l'hypothèse selon laquelle :

***Hypothèse: L'utilisation de la gestuelle diminuera l'impact de la charge cognitive sur la performance de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.***

Attardons-nous maintenant sur cette dimension comportementale, la gestuelle, dans un contexte d'apprentissage. Nous aborderons son rôle prédominant quant à la performance de l'enfant, et l'information communiquée (niveau de compréhension de l'apprenant) en contexte d'usage de ses mains.

## **1.2 La gestuelle dans un contexte d'apprentissage**

De nombreux articles démontrent que le mouvement a un effet positif sur la cognition des enfants, leur apprentissage et sur 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 (Raedy Ping et Goldin-Meadow, 2010; Raedy M Ping et Goldin-Meadow, 2008), 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 aisément être intégrée dans différents programmes traditionnels d'apprentissage, plus spécifiquement dans le cas de *résolutions mathématiques complexes pour les très jeunes enfants*.

Par ailleurs, dans la littérature, l'on distingue deux courants de recherche ayant trait à la gestuelle. Le premier s'attarde sur les effets et implications résultant du mouvement corporel dans son ensemble («whole-body movements»), et se penche sur des sujets tels que l'exercice physique et son effet sur la santé, la cognition, l'apprentissage, etc. Le second cible les mouvements induits par une partie précise du corps («part-body movements», ex. : main, bras) et tente d'expliquer leurs effets sur la cognition ou l'apprentissage (Chandler et Tricot, 2015 : 366).

Bien que les deux axes de recherche traitent du mouvement et de ses liens avec la cognition et l'apprentissage, les deux types d'études ont toujours été conduits de manière indépendante et obéissaient à des objectifs de recherche distincts. En effet, en ce qui concerne le mouvement corporel dans son ensemble, il fut question de tester et de déceler quels mouvements étaient inutiles et nuisibles au phénomène d'apprentissage. Quant aux mouvements ciblés, il s'agissait de cerner quels gestes favorisaient le développement cognitif et l'apprentissage de l'enfant (Chandler et Tricot, 2015 : 366). Notre contexte d'étude ayant trait aux interactions Enfant-Machine sur tablette, l'on s'intéressera principalement aux mouvements de la main. Notre recherche s'inscrit donc dans la revue de littérature liée aux «part-body movements». La section suivante présentera dans un premier temps ce que peut révéler la gestuelle au sujet d'un apprenant (niveau de compréhension, d'assimilation, difficultés...) puis dans un second temps la relation entre la gestuelle et la performance d'un sujet. Nous présenterons les concepts clé reliant dimensions comportementale et cognitive et nous intéresserons finalement aux gestes particulièrement reconnus favorisant le phénomène d'apprentissage.

### **1.2.1 Ce que la gestuelle révèle du niveau de compréhension d'un apprenant**

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). De plus, «the use of gesture during the one-word period can extend the range of ideas a child can express» (McNeill, 2000 : 237-238).

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, ALiBAL

et Goldin-Meadow (1993) constatèrent 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. Autre constat intéressant, les explications verbales fournies par les enfants dont les gestes ne coïncidaient pas avec le discours étaient souvent fausses. Le contenu communiqué par la gestuelle était différent et parfois même plus avancé en termes de raisonnement que l'explication énoncée oralement (Reynolds et Reeve, 2001). Cette situation porte le nom de «gesture-speech mismatch», ou inadéquation geste-discours (Reynolds et Reeve, 2001 : 449, traduction libre). Certains auteurs avancent que ces enfants se trouvent en situation de dissonance cognitive : «a state in which several ways of solving a problem are simultaneously activated» (Goldin-Meadow *et al.*, 1993 : 279).

Selon Novack et Goldin-Meadow (2015 : 406), les apprenants répondant à ce cas de figure en sauraient plus qu'ils ne l'expriment. Les auteurs postulent que les informations uniquement communiquées par le comportement de l'enfant sont des *connaissances encapsulées* et implicites («encapsulated and implicit knowledge»), non accessibles. En effet, la gestuelle n'étant ni sujette ni limitée aux conventions de langage, le sujet est libre d'explorer maintes hypothèses (Novack et Goldin-Meadow, 2015).

Enfin, selon Goldin-Meadow *et al.* (1993), cet état de dissonance cognitive sert d'indice de référence concernant des changements imminents de charge cognitive nécessaires pour effectuer la tâche. L'enfant qui traduit de nouvelles idées en gestes est tout simplement en train d'apprendre ; il se trouve dès lors dans un *état de transition* qui laisse présager une bonne assimilation du concept (Goldin-Meadow, 2005). Finalement, ALiBAL et Goldin-Meadow (1993) viennent densifier notre propos en affirmant que c'est durant cette phase transitoire que la portée des *explications* fournies par un instructeur (parents, professeurs ...) sera la plus efficace; les commentaires étant mieux compris, ceux-ci seront plus bénéfiques aux apprenants.

Enfin, Roth (2000) affirme que les étudiants manquant de vocabulaire pour s'exprimer au sujet de faits scientifiques usent généralement de gestes pour expliquer adéquatement leurs propos. Les résultats démontrent que lorsque le niveau de langage devient suffisamment élevé, gestes et discours deviennent coordonnés. C'est finalement à ce moment que l'enfant est familier avec les concepts étudiés. Ainsi, l'utilisation de gestes appuyant correctement une théorie présuppose une *compréhension à venir* des éléments à assimiler. Il serait maintenant légitime de se demander ce qui adviendrait aux enfants n'intégrant aucun geste à leur raisonnement : la performance d'un sujet usant de ses doigts serait-elle plus élevée que lorsqu'il ne s'en servirait pas? Les études présentées dans la prochaine section répondent à notre questionnement.

## 1.2.2 Gestuelle et performance

Des études antérieures révèlent que le fait d'**encourager** les enfants à user de gestes lors de leur démonstration permet à la sphère d'idées implicites et «encapsulées» de surgir. En effet, les chercheurs Broaders *et al.* (2007) conduisirent une étude demandant aux enfants d'expliquer leur solution, erronée, à un problème mathématique donné. Dans le cadre de cette recherche, les auteurs demandèrent aux participants de résoudre d'autres exercices, comparables à ceux traités antérieurement, en encourageant cette fois-ci la moitié des apprenants à utiliser leurs mains (Groupe A) quand viendra le moment d'expliquer leur raisonnement. Les résultats de cette étude démontrent que les apprenants à qui on avait demandé d'utiliser des gestes (Groupe A) pour s'exprimer **ajoutèrent de nouvelles idées, stratégies à leur répertoire** ; cependant ces stratégies apparaissaient uniquement via la dimension comportementale de l'explication. Parallèlement, les enfants n'ayant pas reçu la consigne d'utiliser leurs membres pour appuyer leur propos (Groupe B) n'ajoutèrent aucune stratégie à leur raisonnement initial. Autre résultat essentiel de l'étude : les apprenants présentant de nouvelles stratégies (Groupe A) tirent davantage de **bénéfices des instructions fournies par les instructeurs**. Une fois l'expérience passée, ceux-ci résolvent correctement des exercices préalablement incompris (avant l'expérience).

De plus, Butterworth (1999 : 259-260) reprend le phénomène en se plaçant dans un contexte d'apprentissage des mathématiques, et affirme que: *«without the ability to attach number representations to the neural representations of fingers and hands in their normal locations, the numbers themselves will never have a normal representation in the brain»*

Par ailleurs, Fayol, Barrouillet et Marinthe (1998) démontrèrent qu'un test neuropsychologique, incluant la mesure de la gnose du doigt (c.-à-d., capacité à reconnaître quel doigt est stimulé lorsqu'on le touche en fermant les yeux (Gracia-Bafalluy et Noël, 2008)), conduit à l'âge de cinq ans, était remarquablement prédictif des aptitudes numériques de l'enfant trois ans plus tard. Noël (2005) obtint des résultats similaires quant à la caractéristique prédictive de la gnose du doigt révélant les aptitudes numériques, et non relatives à la lecture, d'un apprenant quinze mois plus tard.

Les résultats antérieurs suggèrent donc que la gestuelle favorise la performance de l'apprenant, qui plus est dans un contexte d'apprentissage des mathématiques. De là,

***Hypothèse : La gestuelle est positivement liée à la performance de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.***

Intéressons-nous maintenant aux leviers grâce auxquels l'usage de gestes favorise le phénomène d'apprentissage.

### 1.2.3 Comment la gestuelle favorise-t-elle l'apprentissage?

En plus de réduire la charge cognitive de l'enfant (cf. section 1.1.4.8), la gestuelle peut favoriser le processus d'apprentissage lorsqu'un enfant *observe la gestuelle* d'un enseignant expliquant un concept, sans que l'enfant ait à effectuer lui-même quelconque mouvement (Church, Ayman-Nolley et Mahootian, 2004; Cook, Duffy et Fenn, 2013; Valenzeno, Alibali et Klatzky, 2003).

À titre d'exemple, les gestes de pointer («pointing») et de tracer («tracing») utilisés par l'enseignant afin d'illustrer la symétrie d'une courbe aident les enfants à comprendre le concept de symétrie bilatérale (Valenzeno, Alibali et Klatzky, 2003 : 187). Ceci permet à l'apprenant de développer sa capacité à *lier un langage abstrait à son environnement physique et concret, immédiat* (Valenzeno, Alibali et Klatzky, 2003 : 187).

Par ailleurs, l'étude conduite par Ping and Goldin-Meadow (2008) consistait à énoncer des consignes, à l'aide de gestes, ou en l'absence de gestes, à des enfants âgés de cinq à sept ans (exercice de conservation de Piaget). De plus, les gestes des enseignants impliqués dans l'étude, qui illustraient la hauteur et la largeur de deux verres, étaient produits en la présence ou en l'absence des objets (verres). Les étudiants dont les auteurs appuyaient leurs propos via l'utilisation de la gestuelle, en présence ou en l'absence de verre, progressèrent davantage que ceux ayant entendu l'explication uniquement verbalement. La présence ou l'absence d'objet n'affectait en rien l'issue de l'expérience. Ainsi, les résultats suggèrent que l'utilisation de gestes lors de l'exposition des consignes d'un exercice favorise l'apprentissage des enfants en *communiquant des concepts abstraits sous forme représentée*.

Enfin, l'incorporation de gestes dans un discours explicatif divulgue multiples stratégies de manière simultanée. En effet, Singer et Goldin-Meadow (2005) démontrèrent que les enfants renaient davantage de concepts mathématiques lorsque leur professeur communiquait la même solution sous deux formes : «discours – geste » et «discours – discours». Toute la force et *l'efficacité* de la gestuelle proviennent du fait que *cet acte accompagne aisément le discours*. Ainsi, dissocier discours et gestuelle, en expliquant d'abord les concepts oralement, pour ensuite les illustrer en mimant aurait une portée moindre qu'un discours associé aux mouvements (Congdon *et al.*, 2015; Novack et Goldin-Meadow, 2015).

Les bénéfices associés à l'utilisation de la gestuelle quant à sa caractéristique de connecter l'apprenant à son environnement immédiat et de favoriser son apprentissage sont notamment liés à la dimension cognitive de l'individu.

La «cognition incarnée» (ou «Embodied-cognition») est sollicitée lorsqu'il s'agit d'expliquer comment des mouvements ciblés contribuent à l'apprentissage d'un individu, et ce, dans différents domaines tels que la sémantique (Lindemann *et al.*, 2006) apprentissage du langage (Zwaan et Taylor, 2006) ou les neurosciences (Glenberg *et al.*, 2008).

Selon le concept de cognition incarnée, le corps et l'environnement sont étroitement liés à l'activité cognitive d'un individu. La cognition ne serait pas uniquement une activité mentale, très localisée, mais serait liée à l'esprit, au corps et à l'environnement (Beer, 1995 : 182, traduction libre). Il faudrait donc étudier cet ensemble d'éléments si l'on prétend étudier toute dimension cognitive d'un individu (Wilson, 2002).

Par ailleurs, en plus des recommandations formulées par Mayer et Moreno (2002), l'individu peut en réalité contrôler une partie de l'environnement externe afin de faciliter sa compréhension de la tâche, ses ressources cognitives étant limitées (section 1.1.3). En effet, celui-ci peut soit 1) décider de laisser de côté une partie de l'information (et ne prendra donc pas le temps de traiter l'intégralité du contenu présenté), soit 2) entreprendre des actions épistémiques afin d'altérer l'environnement pour que le travail cognitif à fournir, pour l'effort de résolution restant, soit diminué (Wilson, 2002). Par définition, les actions épistémiques, concept inspiré de Kirsh et Maglio (1994) désignent «les actions entreprises pour altérer l'environnement physique et immédiat de l'individu (...). Les actions épistémiques visent à sélectionner l'information à traiter, à réduire les ressources mémorielles requises pour effectuer une tâche, à réduire le nombre d'étapes avant de résoudre un problème, ou à réduire la probabilité de faire une erreur lors du raisonnement logique de l'individu» (Kastens, Liben et Agrawal, 2008 : 1, traduction libre).

Il est donc possible de manipuler l'environnement afin de résoudre un problème. Prenons le cas d'une résolution d'un problème mathématique par l'utilisation de ses doigts. Dans ce cas de figure, les mouvements relatifs au dénombrement peuvent être amples, francs et facilement interprétables. Or ceux-ci pourraient également être plus discrets et moins visibles (Wilson, 2002). En effet, certaines activités motrices peuvent être stimulées sans gestes manifestes apparents associés. En effet, il s'avère que de manière générale, ces ressources sensorimotrices servent d'une part à modéliser certains éléments tangibles du monde physique, et permettent d'autre part de représenter, interpréter et extrapoler l'information (Wilson, 2002). En somme, des modélisations sensorimotrices de

l'environnement sont étroitement impliquées dans le processus cognitif humain (Wilson, 2002), qui plus est dans un contexte d'apprentissage des mathématiques.

Nous venons donc de présenter le concept de *cognition incarnée* («embodied cognition») nous permettant de mettre en évidence un lien manifeste entre l'activité cognitive d'un sujet et son environnement, en relevant finalement l'impact des activités sensorimotrices dans ce processus.

Mavilidi *et al.* (2015) résumant finalement l'ensemble des bénéfices et mécanismes cognitifs associés à la gestuelle en ces termes: «*An explanation for the positive effects on learning is that embodying knowledge through making gestures results in a distinct, visuospatial representational format that can enrich the way information is coded, i.e., the construction of higher quality cognitive schemas (Goldin-Meadow et al., 2001; Fred Paas et Sweller, 2012). Higher-quality cognitive schemas are associated with better and less cognitively demanding learning (Goldin-Meadow et al., 2001; Raedy Ping et Goldin-Meadow, 2010), which materializes in faster and more accurate performance on a learning test*». (Mavilidi *et al.*, 2015 : 415)

Tâchons maintenant de déceler quels types de gestes sont précisément associés à l'apprentissage de l'enfant.

## 1.2.4 Gestes apparentés à l'apprentissage

### 1.2.4.1 Utilisation de la main

Selon Hu, Ginns et Bobis (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 impacter le processus cognitif d'un individu. En effet, 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 à la fois vecteur d'interaction avec l'environnement de l'enfant, mais sont également gage d'apprentissage. Ceux-ci vous sont présentés dans la section suivante.

### 1.2.4.2 Utilisation des doigts

Geste déictique : pointer du doigt

Le geste de montrer ou pointer du doigt, geste qualifié de «déictique» selon la classification de McNeill (1992 : 76, traduction libre), en touchant ou non quelconque objet ou surface, se révèle être

connu pour être associé à l'apprentissage. En effet, le geste de ***pointer*** du doigt affecte le ***traitement d'information***, ceci se répercutant sur l'apprentissage du sujet (Hu, Ginns et Bobis, 2015).

De plus, selon Liszkowski *et al.* (2012), ce geste est relativement ***intuitif dès le plus jeune âge*** : « One of the most characteristic means of human prelinguistic communication is the pointing gesture, emerging around 12 months of age ». (Liszkowski *et al.*, 2012 : 699)

L'acte de pointer agit donc comme une ***forme de connaissance biologique primaire*** en mesure de favoriser l'assimilation de connaissances biologiques secondaires (Hu, Ginns et Bobis, 2015).

Ainsi, l'acte de pointer sert de ***démonstrateur***, guidant l'attention de l'interlocuteur. 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, Ginns et Bobis, 2015). Ceci se révèle particulièrement pertinent dans le cas d'une 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).

### Geste métaphorique : compter sur ses doigts

Par ailleurs, ***l'utilisation des doigts*** est associée depuis fort longtemps à un contexte de ***dénombrement*** numérique (Gracia-Bafalluy et Noël, 2008 : 368), geste qualifié de « métaphorique » dans la classification des gestes de McNeill (1992 : 76, traduction libre). En effet, dans le cadre du développement cognitif d'un enfant, les doigts permettent de représenter les numéros avant même leurs représentations symboliques, c.-à-d., 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, l'on considèrera que l'enfant n'aura pas assimilé la notion de quantités (Brissiaud, 2011). De plus, l'usage des doigts pour compter 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*** (DC Geary, 2005) en ***allégeant la charge de mémoire de travail*** (« working memory ») (Martha Wagner Alibali et DiRusso, 1999), ***augmentant de ce fait l'exactitude (« accuracy ») de la réponse*** (DC 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***.

Pour conclure, l'utilisation de la main, plus précisément l'utilisation des doigts, a donc un impact négatif sur la charge cognitive d'un individu, plus spécifiquement celle d'un enfant, et tendrait à augmenter la performance du sujet, dans un contexte d'apprentissage.

Notre cadre conceptuel issu des hypothèses formulées tout au long de notre premier chapitre vous est présenté dans le second chapitre.

## 2 Chapitre 2 : Cadre conceptuel

L'objectif de cette étude est de 1) mesurer l'impact de la gestuelle sur la charge cognitive et sur la performance d'un enfant, et 2) de tester ses effets modérateurs sur le niveau de difficulté de la tâche, dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.

Afin de répondre à notre objectif de recherche, notre modèle se base sur les hypothèses formulées tout au long de notre revue de littérature. Notre première hypothèse stipule que la difficulté d'une tâche induisant une forte charge cognitive intrinsèque est, par conséquent, positivement liée à la charge cognitive d'un apprenant (Pollock, Chandler et Sweller, 2002 : 62). De plus, une diminution de la charge cognitive tend à augmenter la probabilité de succès à une question donnée (Sweller, 1988). En effet, l'individu verrait son risque de se trouver en état de surcharge cognitive limité. Par ailleurs, parmi les mécanismes de réduction de la charge cognitive, l'utilisation de la gestuelle est particulièrement probante quant à son effet sur la cognition et sur la performance de l'apprenant dans un contexte d'apprentissage (Goldin-Meadow *et al.*, 2001). La théorie du CLT ainsi que tous les phénomènes y faisant référence peuvent aisément être abordés dans un contexte d'apprentissage numérique, où les nouvelles technologies servent de support d'enseignement. L'ensemble de ces hypothèses seront donc testées dans un contexte d'apprentissage numérique, induisant une interaction multimédia enfant-machine. Nos résultats pourront contribuer à l'élaboration de produits pédagogiques numériques pour enfants.

Enfin, nous testerons l'effet modérateur de la gestuelle sur la relation entre le niveau de difficulté de la tâche et la charge cognitive, pour enfin nous intéresser à son effet modérateur sur la relation établie entre la charge cognitive et la performance de l'apprenant.

Veillez trouver l'ensemble des hypothèses de notre modèle, appliquées dans un contexte d'apprentissage numérique, présentées de manière numérotée et ordonnée de la manière suivante :

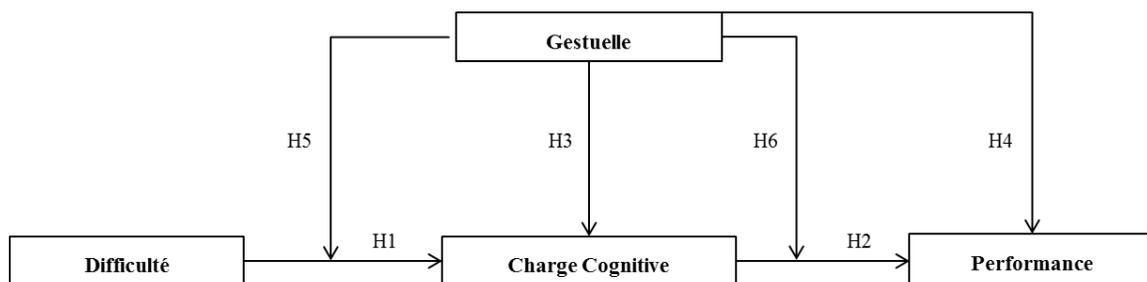


Figure 3 – Modélisation de nos hypothèses

<b>Hypothèses</b>	
H1	La difficulté est positivement liée à la charge cognitive de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.
H2	La charge cognitive est négativement liée à la performance de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.
H3	La gestuelle est négativement liée à la charge cognitive de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.
H4	La gestuelle est positivement liée à la performance de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.
H5	L'utilisation de la gestuelle diminuera l'impact de la difficulté sur la charge cognitive de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.
H6	L'utilisation de la gestuelle diminuera l'impact de la charge cognitive sur la performance de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.

**Tableau 1 – Hypothèses de notre étude**

### 3 Chapitre 3 : Méthodologie

Vous trouverez dans ce chapitre une présentation détaillée du design expérimental, des stimuli de l'expérience, des participants ainsi que de notre collecte de données (prétests et tests). Les méthodes et instruments de mesure vous seront par la suite exposés, pour finalement décrire avec précisions comment nous avons opérationnalisé notre modèle afin de tester nos hypothèses et répondre à notre question de recherche.

Enfin, ce projet a été approuvé par le Comité d'Éthique de la recherche (CER) de HEC Montréal, sous l'intitulé «Effet de la réduction de l'émotion négative liée au design sur l'efficacité des applications éducatives et de formation» le 7 décembre 2015. Cette soumission incluait l'approbation pour une collecte de données à partir de sujets humains mineurs via l'utilisation d'un formulaire de consentement signé par ces derniers et leurs parents.

#### 3.1 Design expérimental

En premier lieu, notons que l'étude conduite dans le cadre de ce mémoire est une étude intra sujets. La difficulté de recrutement liée à la spécificité de nos participants (enfants âgés de 7 à 11 ans) ne nous permet pas de conduire une étude inter-sujets, qui nécessiterait un groupe contrôle et un groupe test suffisamment élevés pour fournir des résultats probants.

Notre étude a été conçue de la sorte. Les participants s'étant présentés étaient conviés à répondre à trente questions (ou problèmes) mathématiques à résoudre, ou plus exactement à 5 exercices, chacun constitué de 6 questions contre balancées, jugées faciles ou difficiles (cf. définition de la difficulté décrite dans la section 3.5.3).

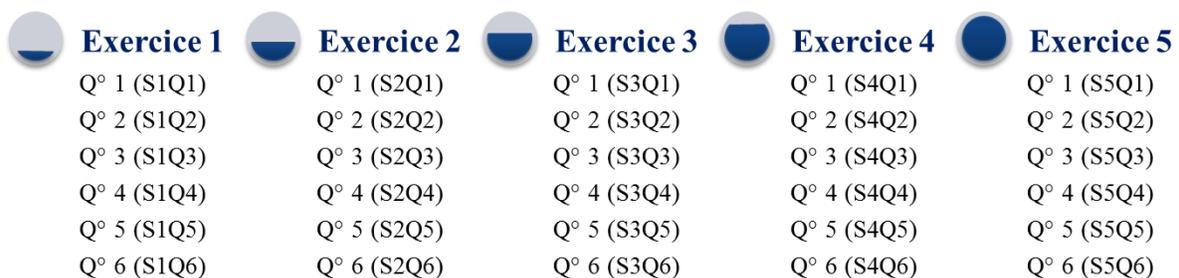


Figure 4 – Design expérimental de notre étude

Les questions, en plus d'être faciles ou difficiles, étaient non contextualisées (pure arithmétique) ou contextualisées à un problème. Parmi les questions non contextualisées, le participant répondait à des consignes telles que : «Subtract. What is  $9 - 7$ ?», «Add and chose the right answer :  $26 + 6$ », etc.

Le participant était libre de répondre ou non à la question posée. Si celui-ci décidait de se plier au jeu, en répondant à la question, il appuyait sur «Check the answer» (encadré 1, Annexe2), et prenait alors immédiatement connaissance de l'évaluation de sa solution : «Bonne» ou «Mauvaise Réponse» via un «feedback» visuel et sonore apparaissant à l'écran.

Dans le cas échéant, si le participant ne souhaitait pas se prononcer sur la question présentée, celui-ci pouvait passer directement au problème suivant en appuyant sur «Next» (encadré 2, Annexe 2). La note obtenue pour la question était par conséquent nulle.

Enfin, l'ordre des exercices était distribué aléatoirement pour chacun des enfants, et ce afin de minimiser son effet sur les participants. En effet, nous voulions contrôler la difficulté intrinsèque de la question sans biais liés aux facteurs tels que la fatigue, baisse de concentration, baisse de motivation potentiellement plus importante en fin d'expérience qu'en début.

À noter que le temps moyen de participation pour chaque sujet était de 1h27 (à noter que cette durée tient compte de l'accueil du participant et du parent légalement responsable, de la calibration de l'oculomètre, du temps de pause et d'une seconde partie d'expérience dont les données ne nous servent pas dans le cadre de notre étude).

## 3.2 Stimuli expérimentaux

L'application pédagogique de résolution de problèmes mathématiques sur tablette (HMH Player version 1.5) nous a paru appropriée pour tester nos hypothèses pour différentes raisons.

En effet, un contexte de résolution de problèmes mathématiques semblait être un contexte d'étude nous permettant de mesurer et tester nos variables. Comme énoncé dans notre revue de littérature, de nombreuses études comportementales préconisent ce type d'environnement d'apprentissage, favorable à l'utilisation des doigts (compter, pointer, ...) pour alléger la charge cognitive (Martha W Alibali *et al.*, 2014; Goldin-Meadow *et al.*, 2001; Reynolds et Reeve, 2001)

Par ailleurs, une collaboration avec une équipe de développeurs de l'application et pédagogues nous a permis de manipuler le niveau de difficulté des questions, afin de pouvoir contrôler la variable «difficulté» de notre modèle. Quant à la mesure de performance de notre cadre conceptuel, cette

application nous permettait d'évaluer le score du participant à la fin de chacune des questions puisque ce dernier devait vérifier sa réponse en appuyant sur «check the answer» avant de passer à la question suivante. Cette rétroaction («feedback») sonore, positive ou négative nous permet donc d'allouer un score pour chacune des réponses du sujet: 1 si la réponse donnée par le participant est bonne, 0 si la réponse donnée ne correspond pas à la réponse attendue.

Pour toutes ces raisons, l'application d'exercices mathématiques HMH Player version 1.5, destinée aux enfants de deuxième année de primaire et utilisée sur tablette (iPad) a été jugée apte à tester nos hypothèses de recherche.

### 3.3 Collecte des données

Notre étude a été réalisée au Tech3Lab de HEC Montréal, du 14 novembre 2015 (1er prétest) au 10 janvier 2016 (dernier participant).

#### Prétests

Au cours de ce projet, trois prétests ont été réalisés afin d'adapter notre protocole expérimental et de nous assurer de la fiabilité de nos outils de mesure. Ces prétests nous ont permis de régler les problèmes techniques liés d'une part à l'expérience en soi, d'autre part à la caractéristique peu commune de nos participants : le jeune âge des enfants. Le tout afin de garantir la validité de nos résultats. L'enjeu était donc d'obtenir une qualité de données optimale, tout en sachant que les participants allaient être plus mobiles, plus petits, et plus spontanés que des adultes. Les appareils, capteurs, et outils de mesure ont donc été déplacés à maintes reprises afin de répondre au profil des répondants. Veuillez trouver la configuration de la salle de collecte, ainsi que l'installation finale des appareils en Annexe 3.

#### Tests – Protocole détaillé

Dans un premier temps, le consentement du participant et celui du parent-accompagnateur étaient obtenus via un formulaire de consentement, dûment signé. Une fois le participant installé, prêt à utiliser l'iPad, la personne conduisant l'expérience veillait à calibrer l'oculomètre Tobii x60. Un simple exercice de fixation de 5 points prédéterminés sur l'écran permettait d'y arriver (Annexe 4). Une fois la calibration achevée, la personne responsable de l'expérience communiquait avec les responsables techniques chargées des réglages et de la gestion des appareils en route qui capturaient les mesures de notre étude afin de s'assurer que tout était fonctionnel. L'expérience pouvait ensuite commencer.

L'enfant répond aux différents exercices de 6 questions consécutives. Une fois l'étude terminée, parents et enfants se voient remettre un livre et une compensation de 50\$, telle qu'annoncée dans l'annonce parue (Annexe 5).

## 3.4 Participants

Les enfants choisis pour notre étude devaient être en mesure de lire une consigne, tout en éprouvant suffisamment de difficulté pour que ceux-ci se servent de leurs doigts pour effectuer la tâche préconisée (exercice mathématique). Des enfants âgés de 7 à 9 ans (niveau scolaire de deuxième année de primaire) correspondirent parfaitement à nos contraintes d'échantillonnage.

### 3.4.1 Recrutement

Le recrutement des participants s'est principalement fait par deux moyens ; via une première diffusion électronique de l'information en sollicitant la base de données du Panel HEC et via l'utilisation de médias plus traditionnels. Une annonce (Annexe 5) a en effet été publiée dans l'hebdomadaire anglophone (The Suburban). Enfin, des tracts ont été déposés de manière physique dans des lieux de vie et quartiers montréalais correspondant à nos participants ciblés (Outremont, Café garderie, boulangerie de quartier...) afin d'améliorer la portée de notre message.

### 3.4.2 Critères d'exclusion

Notre contexte d'étude de la gestuelle dans un contexte d'apprentissage des mathématiques sur tablette nous pousse à nous pencher sur le choix de l'âge approprié des participants pour étudier le phénomène (utilisation de ses doigts lors de la résolution de la tâche). Piaget (1970 : 29-33, traduction libre) présente quatre stades de développement cognitif associés à l'âge des enfants : *stade sensorimoteur* (naissance à 2 ans), *stade préopérationnel* (2 à 7 ans), *stade opérationnel concret* (7 à 11 ans) et *stade opérationnel formel* (plus de 11 ans). De 2 à 7 ans, c.-à-d. durant le *stade préopérationnel*, le temps de concentration des enfants est bref, et les jeunes apprenants ne peuvent retenir qu'une chose à la fois. Enfin, ces derniers éprouvent de la difficulté pour conceptualiser les éléments intangibles. Lors du *stade opérationnel concret*, les enfants, alors âgés de 7 à 11 ans, démontrent des habiletés cognitives se rapprochant de celles de l'adulte, mais ne peuvent toujours pas formuler des hypothèses ni conceptualiser des nombres complexes (Schneider, 1996 : 68-73) cité dans (Jacko, 2012 : 842). Ainsi, le segment ciblé pour tester nos hypothèses était constitué d'enfants âgés de 7 à 11 ans.

Par ailleurs, le principe de fonctionnement de l'oculomètre consiste à envoyer sur la pupille du sujet une lumière infrarouge émise par un ensemble de diodes (Baccino et Colombi, 2001). En retour, la lumière infrarouge réfléchiée par la cornée passe au travers d'une lentille et dessine sur le détecteur optique une image infrarouge complète de l'œil (Baccino et Colombi, 2001). Ainsi, les enfants collaborant pour l'étude ne devaient pas porter de verres correcteurs pour la vue (et n'auront pas eu de correction laser de la vue). Par ailleurs, ceux-ci n'étaient pas astigmatés. Enfin, les participants ne devaient pas souffrir d'épilepsie et ne devaient présenter aucun trouble psychologique ou neurologique diagnostiqué préalablement.

### **3.4.3 Profil des participants**

Parmi nos participants, 23 enfants, tous âgés de 7 à 9 ans, Canadiens anglophones (ou bilingues) participèrent à notre étude. Parmi ces sujets, les données de seulement 18 enfants furent conservées, considérées fiables. En effet, les données oculométriques de 3 sujets furent inexploitablement en raison de calibration impossible des mouvements des yeux (enfants souffrant potentiellement d'astigmatisme, de problème oculaire). Quant aux 2 autres participants, un problème technique d'enregistrement vidéo des participants ne nous permit pas de repérer les mouvements des mains des sujets.

La moyenne d'âge des participants était de 7 ans et demi et 60% d'entre eux étaient des garçons, 40% donc, des filles.

## **3.5 Mesures et instrumentation**

Afin de répondre à nos objectifs, il était judicieux d'opérer dans un environnement contrôlé, type laboratoire (dans notre cas, le Tech3Lab de HEC Montréal), au vu de la nature de nos variables étudiées, et de la précision de certains outils de mesures physiologiques disponibles. De plus, l'expérimentation est une des méthodes les plus efficaces et «forte» lorsqu'il s'agit de démontrer des relations de causalité entre différentes variables (Jolibert et Jourdan, 2006; Lunenburg et Irby, 2008).

Les différentes méthodes et mesures des variables figurant dans notre modèle vous sont présentées dans les sections suivantes.

### 3.5.1 Charge cognitive

Selon Mayer (2009), il n'existe aucune mesure de la charge cognitive faisant l'unanimité, et universelle.

À titre d'illustration, Fred GWC Paas, Van Merriënboer et Adam (1994) scindèrent la charge cognitive selon deux dimensions : la dimension basée sur la tâche («task-based dimension»), relative à la charge mentale, et la dimension propre à l'apprenant («learner-based dimension»), à savoir l'effort mental. Ces deux dimensions impactent bien évidemment la qualité de l'apprentissage d'un individu.

Wierwille et Eggemeier (1993), eux, invoquèrent trois méthodes de mesure de la charge cognitive : des techniques dites subjectives (questionnaires autoadministrés), des techniques physiologiques et des méthodes axées sur la tâche et la performance («task and performance based»). Les physiologiques font référence au mouvement oculaire, rythme cardiaque, au flux nerveux ou à la pression artérielle. Les variations étudiées servent à mesurer la charge cognitive. Enfin, les techniques sont relatives à la tâche ainsi qu'à la performance du sujet en tenant compte de la difficulté de l'exercice.

Enfin, les recherches de Brunken, Plass et Leutner (2003) classèrent les méthodes d'évaluation de la charge cognitive selon deux critères : leur objectivité («objectivity») et leur relation causale («causal relationship»). La catégorisation des mesures des auteurs vous est présentée dans le tableau suivant.

Scopes	Causal relationship	
	Indirect	Direct
Subjective	Self-reported invested mental effort	Self-reported stress level Self-reported difficulty of materials
Objective	Physiological measures Behavioral measures	Brain activity measures (e.g., fMRI)
	Learning outcome measures	Dual-task performance

Tableau 2 – Catégorisation des techniques de mesure de charge cognitive

Source : Brunken, Plass et Leutner (2003 : 55)

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons opté pour une méthode de mesures physiologiques, **l'oculométrie**, robuste et ayant pour propriété son objectivité qui nous garantira une évaluation fiable de la charge cognitive de nos participants.

Par définition, l'oculométrie est «une technique d'enregistrement des **mouvements des yeux** qui consiste à repérer en temps réel la position du regard au moyen d'un détecteur optique ou d'une caméra vidéo qui sont calés sur le reflet émis par un rayon infrarouge envoyé sur la cornée oculaire.

*Ce dispositif couplé à un système informatique échantillonne régulièrement la position spatiale de l'œil et le **diamètre pupillaire***». (Baccino, 2002 : 101)

Ainsi, en plus de capter le mouvement des yeux, en répertoriant fixations ou saccades (Duchowski, 2007; Holmqvist *et al.*, 2011), l'oculométrie 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, Kahneman et Beatty (1966) démontrèrent que la **dilatation de la pupille** était associée à la charge cognitive. De plus, à titre d'ordre de grandeur, le diamètre pupillaire varie entre 2 mm (constriction maximale : myosis) et 8 mm (dilatation maximale : mydriase) (Gatinel, 2015). De plus, ce diamètre tend à diminuer avec l'âge (Weale, 1986). La pupille peut se dilater jusqu'à 8 mm chez les enfants, adolescents ou jeunes adultes et ne se verra pas supérieure à 5 mm chez les sujets octogénaires (Gatinel, 2015).

Nos mesures associées à la charge cognitive tiendront compte de *la moyenne du diamètre pupillaire*. Or, la charge cognitive variant de manière significative dans le temps (cf. figure 1), nous considérerons également *l'écart-type pupillaire* mesurant la variance du diamètre pupillaire afin d'étudier les variations de l'impact de nos variables sur la charge cognitive. À noter que les mesures de pupille sont prises pour toute la durée de la tâche et non pas uniquement lorsque le sujet compte sur ses doigts ou pointe du doigt.

Pour ce faire et d'un point de vue technique, l'oculomètre Tobii x60 fut utilisé tandis que les mesures furent exploitées grâce au logiciel Tobii Studio.

### 3.5.2 Gestuelle

La saisie de la gestuelle, plus précisément celle ayant trait à la main, autour de l'expérience *Enfant-machine* s'est faite via une codification préétablie par le chercheur issu de la revue de littérature comportementale des enfants dans un contexte d'apprentissage.

L'on rappelle que l'usage des doigts pour dénombrer permet de retenir des éléments dans un contexte de calcul mental (DC Geary, 2005) en allégeant la charge de mémoire de travail («working memory») (Martha Wagner Alibali et DiRusso, 1999), augmentant de ce fait l'exactitude («accuracy») du résultat (DC Geary, 2005; Gracia-Bafalluy et Noël, 2008).

Tâchons de garder à l'esprit que certaines études démontrent que le geste de pointer était lié à la gestion de l'attention de l'apprenant, agissant comme une forme de connaissance biologique primaire (ne requérant, de ce fait, qu'un faible investissement en charge cognitive, cf. section 1.1.1.1.) en

mesure de favoriser l'assimilation de connaissances biologiques secondaires (Hu, Ginns et Bobis, 2015).

Ainsi, dans le cadre de notre étude, l'on évaluera l'impact de la gestuelle en se référant à l'usage des doigts de l'apprenant, plus précisément dans une situation de **dénombrement** (usage des dix doigts) et de **pointage** (index) de l'interface lors de la résolution des problèmes mathématiques proposés. Le chercheur, posté derrière une fenêtre réfléchissante observe et code manuellement les mouvements des mains des enfants en se servant de deux types de marqueurs : marqueurs ponctuels pour le **pointage**, et marqueurs de durée pour le **dénombrement** (déclaration de début et fin de l'action).

Les mesures utilisées dans notre modèle sont les suivantes :

<b>Variables comportementales</b>	<b>Mesures</b>
<i>Gestuelle -- Pointer</i>	Utilisation des doigts pour pointer durant la tâche (0 = non; 1 = oui)
	Nombre de pointages du doigt
<i>Gestuelle -- Compter</i>	Utilisation des doigts pour compter durant la tâche (0 = non; 1 = oui)
	Interruption lors du dénombrement durant la tâche (0 = non; 1 = oui)
	Durée du dénombrement pendant la tâche

Tableau 3 – Mesures utilisées pour l'étude de la gestuelle

### 3.5.3 Difficulté de la tâche

Des experts en didactique des mathématiques élaborèrent les questions présentées aux enfants en veillant à faire concorder niveau scolaire et niveau de difficulté associé, tout en considérant la valeur Q («Q-value») liée à un problème arithmétique.

Étaient qualifiées de «faciles» les sommes de deux chiffres inculquées *en début* de deuxième année de primaire, quand les questions dites «difficiles» relevaient de calculs plus complexes étudiés *en fin* de deuxième année de primaire. La valeur Q permet de définir la complexité d'un calcul arithmétique. En effet, utilisée dans le cadre de ce mémoire lors de l'élaboration des questions, cette mesure permet de rendre compte du contenu informationnel lié à une tâche arithmétique en considérant deux facteurs : la taille du problème à résoudre, ainsi que le nombre d'étapes impliquées dans la résolution du calcul (Thomas, 1963).

Enfin, afin de consolider la validité de nos résultats, les questions ont été **randomisées** en attribuant à chaque participant une série particulière d'exercices à effectuer, comportant chacun 6 questions.

Notre mesure associée à la difficulté, variable manipulée, prendra pour valeur «0» lorsque la question est facile, et «1» lorsque la question est difficile.

### 3.5.4 Performance

La performance de l'apprenant est répertoriée après chaque question. Celui-ci peut donc obtenir une *bonne réponse* ou une *mauvaise réponse*.

Notre mesure associée à la performance sera étudiée via une variable binaire prenant pour valeur «0» dans le cas où l'étudiant obtiendrait une mauvaise réponse, et «1» lorsque l'étudiant répondrait correctement à la question posée.

Or certaines variables associées à la mesure opérationnalisant nos concepts méritent d'être transformées afin de pouvoir être analysées. Ce travail préliminaire à nos analyses vous est présenté dans la section suivante.

## 3.6 Transformations de variables préliminaires à nos analyses

L'ensemble des données ont été saisies et traitées grâce au logiciel Stata (version 14.1). Parmi les variables associées à chaque mesure, certaines ne suivent pas une distribution normale (cf. Annexe 6). Il est donc nécessaire de transformer ces variables continues par l'une de ces transformations suivantes : logarithme naturel, racine carrée, ou inverse, pour lequel le coefficient de symétrie (skewness) et le coefficient d'aplatissement (kurtosis) se rapprocheront le plus possible de 0 pour le skewness, et de 3 pour le kurtosis afin de normaliser les variables d'origine (Park, 2008). L'ensemble des mesures et noms des variables statistiques vous sont présentés dans le tableau 4. À noter que notre propos ne concerne bien évidemment pas les variables binaires de notre modèle.

Enfin, nous considérons ici la moyenne ainsi que l'écart-type du diamètre pupillaire puisque la charge cognitive devient variable dépendante pour notre hypothèse 2 (H2). Il est donc nécessaire de normaliser les deux mesures associées au concept.

### 3.6.1 Écart-type du diamètre pupillaire («ecart-type\_pupillaire»)

La variable «ecart-type\_pupillaire» ne suit pas une loi normale, affichant un coefficient de symétrie (skewness) égale à 4,13 et un coefficient d'aplatissement (kurtosis) égal à 35,37 (Annexe 6, a)

De plus, la variance de l'écart-type pupillaire est proche de zéro, on observe donc peu de variations. Ainsi, afin de mieux nous permettre de capter les variations du diamètre pupillaire, nous allons multiplier «sd\_pupil» par 100, 1000 et 10 000. La meilleure transformation avec le logarithme naturel s'est avérée pour un coefficient de 10 000, de là «dm\_sd\_pupil» (cf. tableau 4).

Par ailleurs, une fois cette première transformation effectuée (x 10 000), le logarithme naturel de (dm\_sd\_Pupil+1), intitulé «ln\_dm\_sd\_Pupil», affichait un skewness négatif égal à -0,67 et kurtosis s'élevant à 3,84 tandis que l'inverse de «dm\_sd\_Pupil» («inv\_dm\_sd\_Pupil») présentait un skewness négatif de -1,63 et un kurtosis de 9,71. Ainsi, afin que la variable «ecart-type\_pupillaire» se rapproche un maximum d'une loi normale, la variable finale utilisée sera donc le logarithme népérien de l'écart-type pupillaire multiplié par 10000, soit «ln\_dm\_sd\_pupil» (cf. tableau 4).

### 3.6.2 Nombre de pointages du doigt («nombre\_pointages»)

La variable «nombre\_pointages» ne suit pas une loi normale, affichant un skewness égal à 11,14 et un kurtosis égal à 133,28 (Annexe 6, b). Cette variable affiche peu de variations (max=15), et une distribution à zéro.

Le logarithme naturel de (Compt\_comport\_pointer +1), intitulé «ln\_Compt\_comport\_pointer», affichait un skewness positif égal à 7,57 et un kurtosis s'élevant à 66,90 tandis que la racine carrée de «Compt\_comport\_pointer» («sqrt\_Compt\_Comport\_Pointer») présentait un skewness positif de 9,48 et un kurtosis de 101,04. Enfin, l'inverse de «Compt\_comport\_pointer» («inv\_Compt\_comport\_pointer») possède un skewness négatif de -5,32 et un kurtosis de 21,86.

Aucune des transformations énoncées ci-dessus ne nous permet de normaliser la variable «nombre\_pointages». Cependant, le logarithme népérien du nombre de pointages, «ln\_Compt\_Comport\_Pointer» se révèle être la transformation normalisant au plus près le nombre de pointages du doigt (cf. tableau 4).

### 3.6.3 Durée du dénombrement («duree\_compter»)

La variable «duree\_compter» ne suit pas non plus une loi normale : skewness égale à 4,15 et kurtosis égal à 25,30 (Annexe 6, c)

Le logarithme naturel de (Total\_Last\_Compter +1), intitulé «ln\_Total\_Last\_Compter», affiche un skewness positif égal à 1,52 et un kurtosis s'élevant à 3,76. La racine carrée de «duree\_compter» («sqrt\_Total\_Last\_Compter») présentait un skewness positif de 2,30 et un kurtosis de 8,40. Enfin,

l'inverse de «Total\_Last\_Compter» («inv\_Total\_Last\_Compter») possède un skewness négatif de -1,24 et un kurtosis de 2,56.

Pour terminer, nous déciderons de choisir la variable «*ln\_Total\_Last\_Compter*», soit le logarithme népérien de la durée du dénombrement durant la tâche, afin que notre variable «duree\_compter» soit normalisée (cf. tableau 4).

### **3.7 Variables statistiques utilisées pour nos analyses**

Veillez trouver dans le tableau présenté ci-après (cf. Tableau 4) une synthèse des mesures visant à affirmer ou réfuter nos hypothèses, mesures opérationnalisant nos concepts et tests présentés dans notre modèle conceptuel.

Concepts	Mesures	Opérationnalisation des mesures		Abréviation transformée
		Abréviation mesure	Statistique de la variable normalisée associée	
Charge cognitive	Moyenne du diamètre pupillaire	«m_Pupil»	«m_Pupil»	«moy_pupillaire»
	Écart-type du diamètre pupillaire	«ecart-type_pupillaire»	«ln_dm_sd_Pupil»	«ecart-type_pupillaire»
Gestuelle -- Pointer	Utilisation des doigts pour pointer durant la tâche (0 = non; 1 = oui)	«Comport_Pointer»	«Comport_Pointer»	«pointer»
	Nombre de pointages du doigt	«Compt_Comport_Pointer»	«ln_Compt_Comport_Pointer»	«nombre_pointages»
Gestuelle -- Compter	Utilisation des doigts pour compter durant la tâche (0 = non; 1 = oui)	«Comport_Compter»	«Comport_Compter»	«compter»
	Interruption lors du dénombrement durant la tâche (0 = non; 1 = oui)	«Interrupt_Comport_Compter»	«Interrupt_Comport_Compter»	«interruption_compter»
	Durée du dénombrement pendant la tâche	«Total_Last_Compter»	«ln_Total_Last_Compter»	«duree_compter»
Difficulté de la question	Niveau de difficulté (0 = question facile; 1 = question difficile)	«Hard_difficulty»	«Hard_difficulty»	«niveau_difficulté»
Performance	Résultat obtenu à la question (0 = mauvaise réponse; 1 = Bonne réponse)	«Correct»	«Correct»	«performance»

Tableau 4 - Présentation des mesures associées aux concepts du modèle

## 3.8 Stratégie d'analyse

Le cœur de nos analyses est constitué de **régressions linéaires multiples standards en mesures répétées** (étude intra-sujets). L'on a donc veillé à utiliser la fonctionnalité «VCE cluster» par participant sur Stata (College, 2015) afin de corriger l'effet de répétition.

De plus, chacune de nos variables étudiées se trouve être variable dépendante et/ou indépendante, voire modératrice, selon l'hypothèse testée.

### 3.8.1 Tests des effets directs de notre modèle

Si l'on considère *H1*, stipulant que la difficulté serait positivement liée à la charge cognitive de l'enfant, l'on se trouve dans le cas où l'on teste l'effet d'une variable binaire (difficulté) sur une variable continue (charge cognitive). La charge cognitive (mesurée par la moyenne pupillaire et l'écart-type pupillaire), est variable dépendante de la relation, quand la complexité de la question («niveau\_difficulté») se trouve être variable indépendante de cette même relation. Les résultats obtenus pour cette hypothèse sont issus de régressions linéaires multiples en mesures répétées présentées sous forme de tableau intitulé «tableau des résultats #».

Quant à *H2*, rapportant que la charge cognitive serait négativement liée à la performance de l'enfant, l'on se trouve dans le cas où l'on teste l'effet d'une variable continue (charge cognitive) sur une variable binaire (performance). Dans ce cas de figure, la charge cognitive (mesurée par la moyenne pupillaire et l'écart-type pupillaire) devient variable indépendante de la relation, quand la performance de l'enfant («performance») se trouve être variable dépendante de cette même relation. Les résultats obtenus pour cette hypothèse sont également issus de régressions linéaires multiples en mesures répétées.

*H3* nous renseigne sur une potentielle relation (négative) entre gestuelle et charge cognitive de l'enfant. Parmi nos cinq mesures liées à la gestuelle, trois variables sont binaires (action de pointer, compter et de s'interrompre), quand les deux dernières sont continues (nombre de pointages et durée du dénombrement). Dans le cadre de cette hypothèse, ces variables comportementales se trouvent être variables indépendantes de la relation, quand la charge cognitive (mesurée par la moyenne pupillaire et l'écart-type pupillaire) est la variable dépendante de la relation. Tout comme les analyses entreprises pour *H1* et *H2*, les résultats obtenus pour *H3* sont également issus de régressions linéaires multiples en mesures répétées.

Enfin, les variables opérationnalisant la gestuelle dans notre modèle sont également variables indépendantes si l'on considère *H4*, testant la relation (positive) entre utilisation de ses mains et performance de l'enfant dans un contexte d'apprentissage. La performance est donc la variable dépendante de notre quatrième hypothèse. L'on effectuera des régressions linéaires multiples en mesures répétées pour tester *H4*.

### 3.8.2 Tests des effets modérateurs de notre modèle

#### *Analyse classique et analyse fine de nos effets modérateurs*

Si l'on s'intéresse maintenant aux effets modérateurs de notre modèle, différents scénarii se présentent et dépendent de 1) la nature de la variable indépendante de la relation modérée et de 2) la nature de la variable modératrice (cf. Tableau 5).

Nature de la variable indépendante de la relation modérée	Nature de la variable dépendante de la relation modérée	Nature de la variable modératrice liée à la gestuelle	Type d'analyse
<i>Binaire</i>	<i>Continue ou binaire</i>	<i>Continue</i>	<i>Classique</i> Régressions linéaires multiples en mesures répétées telles que celles présentées pour H1, H2, H3 et H4 (cf. figure 6).
		<i>Binaire</i>	<i>Fine</i> Utilisation d'une matrice d'analyse des résultats (cf. Tableau 6)
<i>Continue</i>	<i>Continue ou binaire</i>	<i>Continue ou binaire</i>	<i>Classique</i> Régressions linéaires multiples en mesures répétées telles que celles présentées pour H1, H2, H3 et H4 (cf. figure 6).

Tableau 5 - Stratégie d'analyse des effets modérateurs dans le cadre de ce mémoire

Le type d'analyse peut différer des analyses opérées dans la section antérieure (3.8.1), i.e. analyse dite «classique», dans le cas où les variables indépendantes et modératrices sont toutes deux binaires.

En effet, par définition :

$$y = \beta_0 + \beta_1 d_1 + \beta_2 d_2 + \beta_3 d_1 d_2 \quad \text{où } d_1 d_2 = \begin{cases} 1 & \text{si } d_1 = 1 \text{ et } d_2 = 1 \\ 0 & \text{si } d_1 = 0 \text{ et } d_2 = 0 \\ & d_1 = 0 \text{ et } d_2 = 1 \\ & d_1 = 1 \text{ et } d_2 = 0 \end{cases}$$

Figure 5 - Analyse «classique» en contexte de régression en mesures répétées

En opérant de la sorte, on obtient 4 groupes de combinaisons et l'on compare un groupe aux trois autres groupes combinés. Or, afin d'analyser finement nos résultats, l'on veillera à identifier des différences significatives existantes (ou non) entre les groupes en les traitant deux par deux, en utilisant la matrice d'analyse présentée ci-dessous (Tableau 6).

		Variable modératrice (variable dummy)	
		= 0	= 1
Variable indépendante (variable dummy)	= 0	(0,0)	(0,1)
	= 1	(1,0)	(1,1)

Tableau 6 – Analyse «fine» - Matrice d'analyse des effets modérateurs

Le modèle érigeant le type d'analyse pour lequel opter selon la nature de certaines variables vous étant maintenant exposé, tentons de l'appliquer à nos deux hypothèses testant les effets modérateurs de notre cadre conceptuel, H5 et H6.

### Stratégies d'analyse pour H5 et H6

En premier lieu, considérons H5, stipulant que l'utilisation de la gestuelle diminuerait l'impact de la difficulté sur la charge cognitive de l'enfant.

Les variables associées à la gestuelle sont les variables modératrices sur le construit difficulté-charge cognitive (H1). Nous nous trouvons dans la situation où la variable indépendante, la difficulté de la question, est binaire et où trois des cinq variables comportementales et modératrices le sont aussi, quand les deux dernières sont continues. Ainsi, certains de nos résultats seront issus d'analyses «classiques», dont la présentation ne diffèrera pas de celle utilisée pour tester nos hypothèses H1, H2, H3 ou H4, quand le reste des analyses relèvera de l'utilisation de notre matrice d'analyse (cf. Tableau 7).

Variable indépendante de la relation modérée	Variable dépendante de la relation modérée	Nature de la variable modératrice liée à la gestuelle	Type d'analyse
<i>Binaire - Difficulté</i>	<i>Continue</i> - charge cognitive (moyenne et écart-type pupillaire)	<i>Continue</i> - nombre de pointage et durée de dénombrement	<i>Classique</i>
		<i>Binaire</i> - action de pointer, compter et s'interrompre	<i>Fine</i> Utilisation d'une matrice d'analyse des résultats (cf. Tableaux 6 et 10)

Tableau 7 - Stratégie d'analyse des effets modérateurs de H5

Enfin, l'analyse des résultats de H6 ne requerra pas l'utilisation de notre matrice d'analyse des résultats dans la mesure où la variable indépendante, la charge cognitive, est continue (moyenne et écart-type).

## 4 Chapitre 4 : Analyse des résultats

Vous trouverez dans ce chapitre les résultats de notre étude présentés de la manière suivante. Dans un premier temps, nous présenterons nos statistiques descriptives afin d'avoir une vue d'ensemble des caractéristiques de nos variables. Une matrice de corrélation dépeindra ensuite les relations entre nos concepts afin de nous donner un aperçu de liens existants entre les concepts au sein de notre modèle. Enfin, causalités et impacts modérateurs seront testés via notre dernière section présentant les régressions issues de notre cadre conceptuel. À noter que nos hypothèses étant directionnelles, l'ensemble des tests effectués sont unilatéraux («*one-tailed*»). Par ailleurs, nous utiliserons différents seuils de significativité: «NS» pour non significatif, «(Δ)» pour significatif à 0,1, «p\*» pour significatif à 0,05 et «p\*\*» pour une valeur p significative à 0,01. Ainsi, les résultats obtenus affichant une valeur p située entre 0,05 et 0.1 seront perçus comme probants, bien que marginaux, quand ceux affichant une valeur p inférieure à 0,05 marqueront davantage l'effet de la variable testée.

### 4.1 Statistiques descriptives

Nos statistiques descriptives vous sont exposées dans les tableaux 10 et 11. L'on s'attendrait à obtenir un N=280 dans le cas où les mesures étaient intégralement saisies (contexte de mesures répétées). La moyenne du diamètre pupillaire («moy\_pupillaire») des participants durant la tâche (question) est d'en moyenne 4,05 millimètres (mm). La valeur minimale est de 2,79 mm, quand la valeur maximale atteint 5,47 mm. L'écart-type associé à notre variable est de 0,56 mm. De plus, la médiane est égale à 3,91 mm. Enfin, le nombre de mesures captées pour cette variable est de n=276 (contexte de mesures répétées) : 4 mesures ont donc été perdus, ou non captées durant notre expérience.

Quant à la performance de l'apprenant, représentée par la variable «performance», la moyenne des réponses données par question est de 0,81. En d'autres termes, en moyenne, les participants à notre étude ont obtenu 81% de réponses correctes durant les exercices. Notre variable est binaire et prend une valeur nulle pour une mauvaise réponse et égale à 1 pour une bonne réponse. Les 280 mesures visées ont été intégralement obtenues pour cette variable.

Concernant maintenant la difficulté de la question, variable manipulée par le chercheur («niveau\_difficulté»), la moyenne obtenue est de 0,25. Ce résultat nous indique que 25% des questions posées étaient difficiles (=1). Nous avons également obtenu 280 observations pour étudier la variable «difficulté».

Le nombre d'observations obtenues pour les variables comportementales suivantes s'élèvent à 171. L'on a effectivement perdu 109 observations liées à la perte d'information de 8 sujets (Annexe 7).

La variable binaire «pointer» affiche une moyenne égale à 0,04. Autrement formulé, ceci signifie que nos sujets ont en moyenne pointé dans 4% des cas lorsqu'ils répondaient à une question. L'usage des doigts pour pointer ne s'est donc pas manifesté outre mesure durant notre expérience.

De plus, dans le cas où l'enfant pointerait, le nombre de pointages associé à l'événement de pointer était de 0,15 fois. *La répartition des valeurs de l'événement indique que nous manquons de masse critique pour exploiter cette mesure*, puisque sur les 171 valeurs obtenues, seules 7 matérialisaient un acte de pointer (cf. Tableau 8 de fréquences de «nombre\_pointages»), associées aux questions présentées dans le tableau 9. De plus, il s'avère que la valeur maximale de la variable est de 15 fois, or la table des fréquences associées à notre variable indique qu'il s'agit du même individu ayant pointé à lui seul 15 fois, quand un autre enfant pointait à lui seul 5 fois, et 5 autres sujets ont pointé une seule fois durant la tâche.

«nombre_pointages»	Fréquence	Pourcentage
0	164	95,91
1	5	2,92
5	1	0,58
15	1	0,58
<b>Total</b>	<b>171</b>	<b>100</b>

Tableau 8 – Tableau de fréquences relatives au nombre de pointages

Question	Fréquence	Pourcentage
Exercice 1, Q°4	1	14.29
Exercice 1, Q°5	1	14.29
Exercice 2, Q°4	1	14.29
Exercice 2, Q°5	1	14.29
Exercice 3, Q°3	1	14.29
Exercice 3, Q°5	2	28.57
<b>Total</b>	<b>7</b>	<b>100</b>

Tableau 9 - Tableau de fréquences du nombre de sujets ayant pointé pour quelle question

Par ailleurs, si l'on se penche sur les descriptions statistiques de la variable «compter», l'on s'aperçoit que le sujet a utilisé ses doigts pour compter durant la tâche dans 23,98% des cas (n=171). Ainsi, dans près d'un quart des fois, l'enfant utilisa ses doigts pour compter et tenter de répondre correctement à la question posée.

De plus, est-ce que l'enfant se servant de ses doigts pour compter s'était interrompu (moindrement longuement) durant son action de dénombrement? Les résultats obtenus pour la variable «interruption\_compter» indiquent qu'en moyenne, pour 2,34% des cas, la réponse est oui. Ainsi, au cours de la résolution d'une même question, on observe qu'un enfant usant de ses doigts pour compter s'interrompra dans 2,34% des cas, en moyenne.

Enfin, intéressons-nous à la durée du dénombrement durant la tâche. Nos résultats démontrent qu'en moyenne, les enfants usant de leurs doigts pour compter s'exécutent pendant 4,54 secondes. La durée minimale de dénombrement est de 0 seconde (l'enfant ne compte pas), quand le dénombrement le plus long s'étend sur 116,04 secondes. À noter que la valeur médiane est de 0 seconde. Ce résultat nous indique qu'au minimum **50% des participants n'ont pas compté**. En considérant trois écarts-types, on s'attendrait à ce que 99% des valeurs se situent entre 0 et 39,68 secondes. Or la valeur maximale se situe hors de cette fourchette. Ceci nous incite donc à nous référer au tableau des fréquences des valeurs de la variable «duree\_compter» présentées en Annexe 8.

On observe deux valeurs extrêmes (107,14 et 116,04), polarisant à la hausse la moyenne de notre variable. Il y aurait trois groupes de répondants : le premier regroupant 95,96% des répondants dont la durée de dénombrement est comprise entre 0 et 39,77 secondes. On observe également une seconde catégorie de répondants dont la durée de dénombrement se situe entre 40,48 secondes et 44,96 secondes. Finalement, les dernières valeurs observées sont assez dispersées : 62,90 sec., 76,73 sec., 92,92 sec., 105,02 sec., ainsi que nos deux valeurs extrêmes.

Mesure	Moyenne pupillaire	Écart-type pupillaire	Performance	Difficulté de la question
Statistique de la variable associée	«moy_pupillaire»	«ecart-type_pupillaire»	«performance»	«niveau_difficulte»
<b>moyenne</b>	4,05	0,12	0,81	0,25
<b>écart-type</b>	0,56	0,10	0,39	0,44
<b>médiane</b>	3,91	0,10	1,00	0,00
<b>min</b>	2,79	0,01	0,00	0,00
<b>max</b>	5,47	1,05	1,00	1,00
<b>N</b>	276	266	280	280
<b>skewness</b>	0,45	4,13	-1,62	1,13
<b>kurtosis</b>	3,09	35,37	3,61	2,28

Tableau 10 - Statistiques descriptives de nos résultats (première partie)

Mesure	Pointer	Nombre de pointages	Compter	Interruption	Durée du dénombrement
Statistique de la variable associée	«pointer»	«nombre_pointages»	«compter»	«interruption_compter»	«duree_compter»
<b>moyenne</b>	0,04	0,15	0,24	0,02	4,53
<b>écart-type</b>	0,20	1,22	0,43	0,15	11,71
<b>médiane</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>min</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>max</b>	1,00	15,00	1,00	1,00	116,04
<b>N</b>	171	171	171	171	171
<b>skewness</b>	4,63	11,14	1,22	6,31	4,15
<b>kurtosis</b>	22,47	133,28	2,49	40,77	25,30

Tableau 11 – Statistiques descriptives de nos résultats (deuxième partie)

Les statistiques descriptives de nos variables vous étant maintenant présentées, veuillez découvrir les liens existants entre les variables de notre modèle via notre analyse des corrélations.

## 4.2 Corrélations

La matrice de corrélations des variables étudiées vous est présentée ci-dessous (Tableau 12). Certains résultats nous donnent un aperçu du niveau de liaison existant entre celles-ci (valeur p), et de l'intensité régissant la relation (coefficient de corrélation), en ne considérant aucun autre impact de quelconques variables.

Notre premier résultat révèle que l'action de compter est corrélée négativement avec l'écart-type du diamètre pupillaire ( $p=0,053 < 0,1$ ). Le coefficient de corrélation s'élève à  $-0,151$ , indiquant une relativement faible liaison entre les deux variables, même si significative. Ainsi, *lorsque l'enfant compte sur ses doigts lorsqu'il répond à la question, l'écart-type du diamètre pupillaire diminue.*

Par ailleurs, on observe l'interruption lors du dénombrement et la performance de l'apprenant sont significativement et négativement corrélées, affichant une valeur p égale à  $0,012$  inférieure à  $0,1$ . Le coefficient de corrélation associé atteint  $-0,193$ , celui-ci est négatif et traduit un lien existant, bien que relativement faible, entre les deux variables. Ce résultat est particulièrement intéressant puisqu'il indique que *plus un enfant comptera avec ses doigts en s'interrompant, plus sa performance diminuera.*

La durée de dénombrement et l'écart-type du diamètre pupillaire sont également corrélés, avec  $p=0,065$ . Le coefficient de corrélation est de  $-0,144$ , négatif, et indique une relativement faible intensité de corrélation entre les variables. Ce résultat révèle *que lorsque la durée du dénombrement augmente, l'écart-type du diamètre pupillaire diminue.* La pupille se fige, donc.

La durée du dénombrement est également corrélée avec la difficulté de la question, affichant  $p=0,078$ . Le coefficient de corrélation associé est de  $0,135$ , positif bien que nuançant la relation au vu de sa proximité avec zéro. Ainsi, *lorsque la question est difficile la durée totale de dénombrement sera d'autant plus longue (dans le cas où l'enfant compte).* Ce phénomène paraît intuitif et corrobore la théorie selon laquelle l'utilisation de ses doigts aide à la résolution d'un problème complexe, qui induira un temps de résolution plus élevé.

Si l'on s'intéresse maintenant à la partie de droite de notre matrice de corrélation, présentant l'effet des variables inhérentes à la gestuelle entre elles, l'on découvre bon nombre de résultats tautologiques. En effet, on parle uniquement de «nombre de pointages» dans le cas où l'on postulerait que l'enfant pointe. Il en est de même pour la durée du dénombrement durant la tâche,

l'interruption durant le décompte et enfin l'acte de dénombrer: L'enfant doit compter pour que les variables liées à l'événement prennent une valeur quelconque. Celles-ci sont donc évidemment corrélées.

Si l'on s'intéresse maintenant aux corrélations entre les variables liées au pointage et celles relatives au dénombrement, un seul résultat est probant : une corrélation existe entre l'action de pointer et l'interruption lors du décompte, avec une valeur égale à 0,033 (coefficient positif égal à 0,163). De plus, il s'avère que le nombre de pointages est également corrélé avec notre variable de l'interruption, la valeur p atteignant 0,050 et le coefficient de corrélation étant positif et égal à 0,150. Ces résultats s'interprètent de la manière suivante. *Plus un enfant s'interrompt lorsqu'il compte, plus la propension à utiliser ses doigts pour pointer est élevée. De surcroît, celui-ci aura tendance à pointer plusieurs fois (corrélations positives).*

Ces quelques interprétations nous permettent d'obtenir un premier portrait de liens entre nos concepts en ne considérant aucune autre variable. Étayons les effets de modulation et causalités existants en testant nos hypothèses via l'utilisation de régressions linéaires.

	«moy_pupillaire»	«ecart-type_pupillaire»	«performance»	«niveau_difficulté»	«pointer»	«nombre_pointages»	«compter»	«interruption_compter»	«duree_compter»
«moy_pupillaire»	1								
«ecart-type_pupillaire»	0,1454 (0,018)**	1							
«performance»	-0,0041 (NS)	0,0317 (NS)	1						
«niveau_difficulté»	0,0953 (NS)	0,0036 (NS)	0,0461 (NS)	1					
«pointer»	-0,0687 (NS)	-0,1188 (NS)	-0,0987 (NS)	-0,1197 (NS)	1				
«nombre_pointages»	-0,0759 (NS)	-0,1244 (NS)	-0,0850 (NS)	-0,1191 (NS)	0,9944 (0,000)**	1			
«compter»	-0,0786 (NS)	-0,1510 (0,053)*	0,0115 (NS)	0,0849 (NS)	-0,0469 (NS)	-0,0509 (NS)	1		
«interruption_compter»	0,0217 (NS)	-0,0670 (NS)	-0,1925 (0,012)**	-0,0005 (NS)	0,1633 (0,033)**	0,1502 (0,050)**	0,2756 (0,000)**	1	
«duree_compter»	-0,0348 (NS)	-0,1440 (0,065)*	-0,0026 (NS)	0,1351 (0,078)*	-0,0271 (NS)	-0,0321 (NS)	0,9558 (0,000)**	0,3197 (0,000)**	1

Niveau de significativité du test unilatéral : NS non significatif, (Δ) sig. à 0,1, p\* sig. à 0,0500, p\*\* sig. à 0,0100.

Tableau 12 - Matrice de corrélation des résultats de notre étude

## 4.3 Régressions

Rappelons donc que cette section vise à mettre en exergue les effets de modération (s'ils existent) de la gestuelle, ainsi que les relations de causalités régissant notre modèle en testant nos hypothèses. Il s'agira de révéler les impacts de nos variables opérationnalisant l'effet de la gestuelle sur la moyenne du diamètre pupillaire et sur l'écart-type du diamètre pupillaire.

Ainsi, chacune de nos hypothèses sera testée tour à tour. Enfin, l'ensemble des résultats obtenus vous sera présenté de manière synthétique dans le tableau 14.

### 4.3.1 H1 : La difficulté est positivement liée à la charge cognitive de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.

Considérons le résultat impliquant d'abord *la moyenne* du diamètre pupillaire pour ensuite tester notre hypothèse en faisant intervenir *l'écart-type* du diamètre pupillaire.

#### 4.3.1.1 Moyenne du diamètre pupillaire

Nos premiers résultats démontrent que le niveau de difficulté a un impact direct sur la moyenne du diamètre pupillaire, avec  $p=0,023$ , significatif. Le coefficient est positif et égale à 0,1091.

Linear regression					Linear regression			
Number of obs = 169					Number of obs = 169			
F( 1, 9) = 5.42					F( 3, 9) = 2.31			
Prob > F = 0,0448					Prob > F = 0,1454			
R-squared = 0,0118					R-squared = 0,0232			
Root MSE = ,43418					Root MSE = ,43427			
moy_pupillaire	Coef.	Std.Err	t	P> t	Coef.	Std.Err	t	P> t
niveau_difficulté	0,1091	0,0469	2,3300	0,0225	0,1102	0,0423	2,6000	0,0145
pointer					-0,1308	0,1269	-1,0300	0,1645
compter					-0,0925	0,1636	-0,5700	0,2930
_cons	4,0687	0,1301	31,2700	0,0000	4,0963	0,1390	29,4700	0,0000

Niveau de significativité du test unilatéral

**Tableau des résultats 1 – effets de la difficulté, de l'action de pointer et de l'action de compter sur la moyenne pupillaire.**

Ainsi, *une question difficile impacte positivement la moyenne du diamètre pupillaire (H1).*

En d'autres termes, ceci signifie que lorsque la question est difficile, la moyenne pupillaire induite par la résolution du problème sera supérieure à celle suscitée dans un contexte de résolution d'un problème facile. Ceci vient confirmer les résultats énoncés dans notre revue de littérature (section 1.1.3.1) affirmant en effet que la *charge cognitive intrinsèque* croit en fonction de la difficulté d'un problème.

### 4.3.1.2 Écart-type du diamètre pupillaire

En considérant maintenant l'écart-type du diamètre pupillaire :

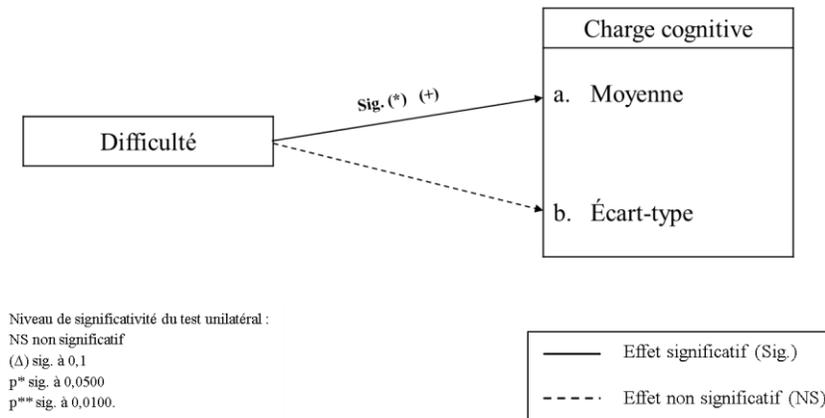
Linear regression					Linear regression			
Number of obs = 165					Number of obs = 165			
F( 1, 9) = 0,00					F( 3, 9) = 3,57			
Prob > F = 0,9499					Prob > F = 0,0600			
R-squared = 0,0000					R-squared = 0,0389			
Root MSE = ,11377					Root MSE = ,11223			
Ecart-type_pupillaire	Coef.	Std.Err.	t	P> t	Coef.	Std.Err.	t	P> t
niveau_difficulté	0,0009	0,0141	0,0600	0,4750	0,0011	0,0125	0,0900	0,4655
pointer					-0,0709	0,0267	-2,6600	0,0130
compter					-0,0413	0,0209	-1,9700	0,0400
_cons	0,1311	0,0119	11,0100	0,0000	0,1444	0,0145	9,9700	0,0000

Niveau de significativité du test unilatéral

**Tableau des résultats 2 - effets de la difficulté, de l'action de pointer et de l'action de compter sur l'écart-type pupillaire**

Ce résultat démontre que le niveau de difficulté n'a aucun impact direct sur l'écart-type du diamètre pupillaire, avec  $p=0,475$ .

Ainsi, *une question difficile n'impacte pas l'écart-type du diamètre pupillaire*, c.-à-d. que la question soit facile ou difficile, l'écart-type du diamètre pupillaire reste le même. Formulé différemment, une difficulté croissante de la question n'affectera pas la variance du diamètre pupillaire.



**Figure 6 – Synthèse des résultats de l'hypothèse 1 (H1)**

En somme,

**Hypothèse 1** : «La difficulté est positivement liée à la charge cognitive de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique» est *partiellement supportée*.

### 4.3.2 H2 : La charge cognitive est négativement liée à la performance de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.

De même que pour l'hypothèse 1, considérons le résultat impliquant d'abord la moyenne du diamètre pupillaire pour ensuite tester notre hypothèse en faisant intervenir l'écart-type du diamètre pupillaire.

#### 4.3.2.1 Moyenne du diamètre pupillaire

Logistic regression					Logistic regression			
Number of obs = 169					Number of obs = 169			
Wald chi2(1) = 1,00					Wald chi2(3) = 1,54			
Prob > chi2 = 0,3178					Prob > chi2 = 0,6719			
Log pseudolikelihood = -89,424164					Log pseudolikelihood = -88,753588			
Pseudo R2 = 0,0072					Pseudo R2 = 0,0147			
performance	Coef.	Std. Err.	z	P> z	Coef.	Std. Err.	z	P> z
moy_pupillaire	0,4923	0,4928	1,0000	0,1590	0,4663	0,5222	0,8900	0,1860
pointer					-0,9361	0,8428	-1,1100	0,1335
compter					0,0503	0,4141	0,1200	0,4515
moy_pupillaire_pointer								
moy_pupillaire_Compter								
_cons	-0,7661	2,1370	-0,3600	0,3600	-0,6249	2,3095	-0,2700	0,3935

Niveau de significativité du test unilatéral

Tableau des résultats 3 - effets de la moyenne pupillaire, de l'action de pointer et de l'action de compter sur la performance

Ces résultats démontrent que *la moyenne pupillaire n'a aucun impact direct sur la performance de l'apprenant, avec  $p=0,159$ .*

#### 4.3.2.2 Écart-type du diamètre pupillaire

Qu'en est-il de l'écart-type du diamètre pupillaire? Obtiendrions-nous le même résultat?

Logistic regression				
Number of obs = 165				
Wald chi2(1) = 0,56				
Prob > chi2 = 0,4549				
Log pseudolikelihood = -88,871838				
Pseudo R2 = 0,0019				
performance	Coef.	Std.Err.	z	P> z
Ecart-type_pupillaire	0,1233	0,1650	0,7500	0,2275
_cons	0,3620	1,0441	0,3500	0,3645

Niveau de significativité du test unilatéral

Tableau des résultats 4 - effet de l'écart-type pupillaire sur la performance

La réponse est : oui. Nos résultats démontrent que *l'écart-type pupillaire n'a aucun impact non plus sur la performance de l'apprenant, avec  $p = 0,228$  (Tableau des résultats 4).*

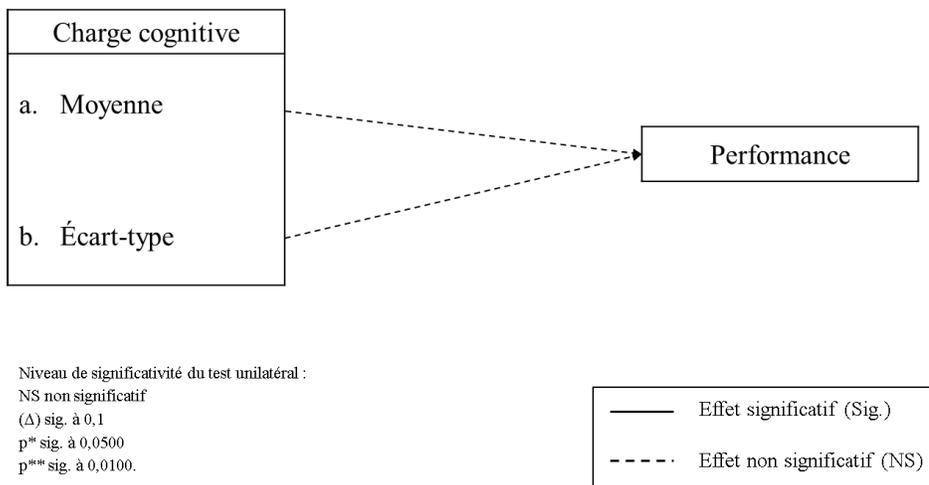


Figure 7 - Synthèse des résultats de l'hypothèse 2 (H2)

En somme,

***H2 : «La charge cognitive est négativement liée à la performance de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.» est réfutée.***

### 4.3.3 H3 : La gestuelle est négativement liée à la charge cognitive de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.

Nous poursuivons l'étude de nos résultats en nous penchant d'abord sur la moyenne du diamètre pupillaire pour ensuite tester notre hypothèse en faisant intervenir l'écart-type du diamètre pupillaire.

#### 4.3.3.1 Moyenne du diamètre pupillaire

Action de pointer durant la tâche («pointer»)

Nos données présentées dans le Tableau des résultats 1 démontrent que l'action de pointer («pointer») n'est pas significative, affichant une valeur p égale à 0,165

Action de compter durant la tâche («compter»)

Le résultat obtenu pour notre variable associée au dénombrement, à savoir «compter» n'est pas non plus significatif, avec une valeur p atteignant 0,293 (Tableau des résultats 1).

Ainsi, le fait de «compter» ou de «pointer» lorsque l'on contrôle la difficulté de la question n'a aucune incidence sur la moyenne du diamètre pupillaire.

## Interruption lors du dénombrement durant la tâche («interruption\_compter»)

Concernant maintenant notre troisième mesure relatant l'effet potentiel de la gestuelle sur la moyenne pupillaire, il s'avère qu'une interruption lors du dénombrement effectué par l'enfant n'affiche pas de meilleure significativité que nos variables présentées ci-haut. En effet, la valeur p est égale à 0,374 supérieure à 0,1 (Tableau des résultats 5), non significative.

Linear regression					Linear regression				
Number of obs = 169					Number of obs = 169				
F( 1, 9) = 5.42					F( 3, 9) = 2.03				
Prob > F = 0,0448					Prob > F = 0,1803				
R-squared = 0,0118					R-squared = 0,0159				
Root MSE = ,43418					Root MSE = ,43589				
moy_pupillaire	Coef.	Std.Err.	t	P> t	Coef.	Std.Err.	t	P> t	
Niveau_difficulte	0,1091	0,0469	2,3300	0,0225	0,1017	0,0418	2,4300	0,0190	
pointer					-0,1346	0,1235	-1,0900	0,1520	
interruption_compter					0,0905	0,2737	0,3300	0,3740	
_cons	4,0687	0,1301	31,2700	0,0000	4,0740	0,1330	30,6400	0,0000	

Niveau de significativité du test unilatéral

**Tableau des résultats 5 - effets de l'interruption lors du décompte sur la moyenne pupillaire.**

Ainsi, *s'interrompre en comptant n'a aucun effet significatif sur la moyenne du diamètre pupillaire.*

## Durée du dénombrement durant la tâche («duree\_compter»)

Intéressons-nous maintenant à notre mesure ayant trait à la dimension temporelle de l'acte de compter : la durée du dénombrement. L'on s'attendrait à ce qu'un enfant comptant longtemps sur ses doigts ait une moyenne pupillaire moindre comparée à un statu quo relatant la même expérience sans utiliser ses doigts (H3).

Linear regression					Linear regression				
Number of obs = 169					Number of obs = 169				
F( 1, 9) = 5.42					F( 3, 9) = 2.03				
Prob > F = 0,0448					Prob > F = 0,1803				
R-squared = 0,0118					R-squared = 0,0176				
Root MSE = ,43418					Root MSE = ,43552				
Moy_pupillaire	Coef.	Std.Err.	t	P> t	Coef.	Std.Err.	t	P> t	
Niveau_difficulte	0,1091	0,0469	2,3300	0,0225	0,1096	0,0471	2,3300	0,0225	
Pointer					-0,1245	0,1241	-1,0000	0,1710	
Duree_compter					-0,0184	0,0663	-0,2800	0,3935	
Niveau_difficulte_duree_compter									
_cons	4,0687	0,1301	31,2700	0,0000	4,0859	0,1367	29,8900	0,0000	

**Tableau des résultats 6 – effets de la durée du dénombrement sur la moyenne pupillaire**

Or on observe une valeur p égale à 0,394 supérieure à 0,1 (Tableau des résultats 6), non significative. Ainsi, *la durée relative au dénombrement lors de la résolution d'une question n'affecte pas directement la moyenne du diamètre pupillaire lorsque l'on contrôle la difficulté.*

### 4.3.3.2 Écart-type du diamètre pupillaire

Nous reprenons notre hypothèse et testons chacune de nos variables afin de déceler leur impact sur, non plus sur la moyenne pupillaire, mais sur l'écart-type pupillaire.

#### Action de pointer durant la tâche («pointer»)

Est-ce que le fait d'utiliser son index pour pointer l'interface numérique impacte négativement l'écart-type pupillaire d'un enfant dans un contexte de résolution mathématique? La réponse est positive, puisque la valeur p associée à la variable «pointer» est significative, égale à 0,013 (Tableau des résultats 2). De plus, on observe un coefficient négatif  $\beta = -0,0709$ . Ainsi, *le fait de pointer a un effet sur la variation du diamètre de la pupille de l'enfant, qui plus est à la baisse.*

#### Action de compter durant la tâche («compter»)

Par ailleurs, *un enfant se servant de ses doigts pour compter diminuera l'écart-type de son diamètre pupillaire.* En effet, la valeur p associée à notre variable est significative, égale à 0,040 et le coefficient négatif  $\beta = -0,0413$  (Tableau des résultats 2). Ainsi, *l'acte de compter semble également être vecteur de diminution de l'écart-type de la pupille, c.-à-d. que cette activité vient « figer » le diamètre pupillaire de l'apprenant.*

Le fait de «compter» sur ses doigts ou de «pointer» a une incidence sur l'écart-type du diamètre pupillaire, contrairement aux résultats de nos variables sur la moyenne du diamètre pupillaire.

#### Interruption lors du dénombrement durant la tâche («interruption\_compter»)

Est-ce qu'un temps d'arrêt prolongé lorsqu'un enfant compte affecte l'écart-type pupillaire de l'apprenant? Nos résultats démontrent que non, affichant une valeur p égale à 0,060 (Tableau des résultats 7), non significative.

Linear regression					Linear regression			
Number of obs = 165					Number of obs = 165			
F( 1, 9) = 0,00					F( 3, 9) = 3,17			
Prob > F = 0,9499					Prob > F = 0,0782			
R-squared = 0,0000					R-squared = 0,0165			
Ecart-type_pupillaire	Coef.	Std.Err.	t	P> t	Coef.	Std.Err.	t	P> t
Niveau_difficulte	0,0009	0,0141	0,0600	0,4750	-0,0026	0,0148	-0,1700	0,4330
Pointer					-0,0629	0,0253	-2,4900	0,0175
Interruption_Compter					-0,0359	0,0209	-1,7200	0,0600
_cons	0,1311	0,0119	11,0100	0,0000	0,1355	0,0121	11,1800	0,0000

Niveau de significativité du test unilatéral

Tableau des résultats 7 - effet de l'interruption lors du dénombrement sur l'écart-type pupillaire

Ainsi, *compter en s'interrompant n'a aucun effet direct sur l'écart-type* du diamètre pupillaire lorsque l'on contrôle la difficulté.

Durée du dénombrement durant la tâche («duree\_compter»)

Attardons-nous finalement sur la durée du dénombrement de l'enfant.

Linear regression					Linear regression				
Number of obs = 165					Number of obs = 165				
F( 1, 9) = 0,00					F( 3, 9) = 3,39				
Prob > F = 0,9499					Prob > F = 0,0673				
R-squared = 0,0000					R-squared = 0,0361				
Root MSE = ,11377					Root MSE = ,11239				
Ecart-type_pupillaire	Coef.	Std.Err.	t	P> t	Coef.	Std.Err.	t	P> t	
Niveau_difficulte	0,0009	0,0141	0,0600	0,4750	0,0031	0,0120	0,2500	0,4025	
Pointer					-0,0685	0,0273	-2,5100	0,0165	
Duree_compter					-0,0138	0,0065	-2,1300	0,0310	
Niveau_difficulte_Duree_compter									
_cons	0,1311	0,0119	11,0100	0,0000	0,1428	0,0141	10,1200	0,0000	

Niveau de significativité du test unilatéral

**Tableau des résultats 8 - effets de la durée du dénombrement sur l'écart-type pupillaire**

On observe une valeur p égale à 0,031, significative et un coefficient négatif Beta=-0,0138 (Tableau des résultats 8). Il s'avère donc que *la durée relative au dénombrement lors de la résolution d'une question fait diminuer l'écart-type* du diamètre pupillaire.

L'effet des variables testées ci-haut sur la moyenne et l'écart-type du diamètre pupillaire vous sont présentés dans la figure suivante, permettant d'obtenir une synthèse de nos résultats représentée de manière visuelle.

En somme, l'hypothèse **H3** : *«La gestuelle est négativement liée à la charge cognitive de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.»* est *partiellement et marginalement supportée*.

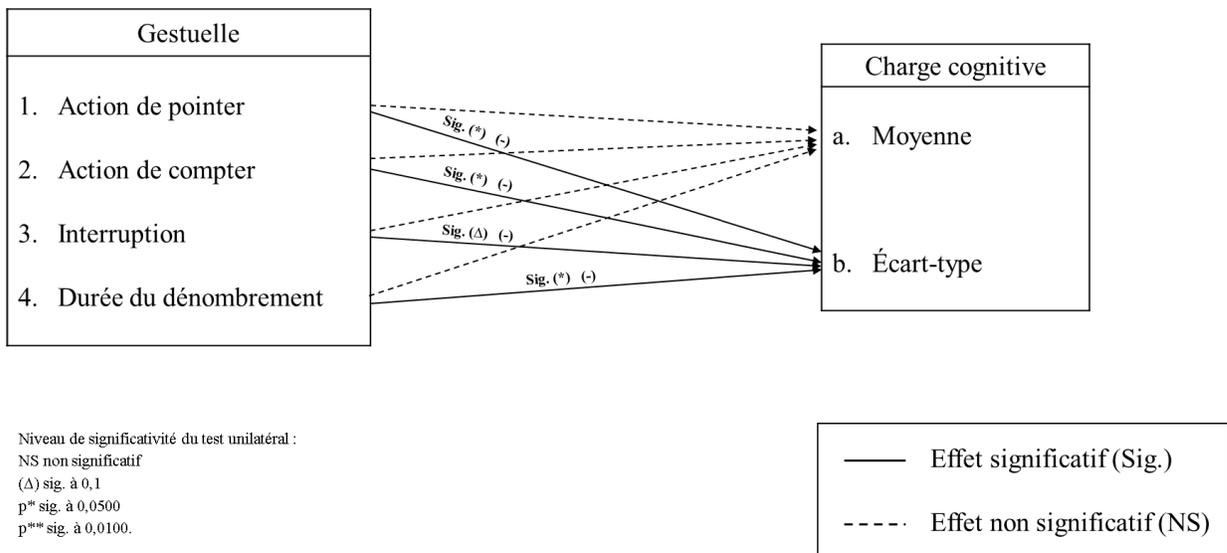


Figure 8 - Synthèse résultats de l'hypothèse 3 (H3)

Il s'agit dès lors de tester H4 afin de savoir si la gestuelle accroît la performance d'un enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.

#### 4.3.4 H4 : La gestuelle est positivement liée à la performance de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.

Nous postulons ici que la gestuelle favoriserait le phénomène d'apprentissage et viendrait accroître la performance d'un apprenant. Comme présenté jusqu'alors, nous veillerons à étudier l'impact de chacune de nos mesures opérationnalisant la dimension comportementale de notre modèle.

##### Action de pointer durant la tâche («pointer»)

Nos données présentées dans le Tableau des résultats 3 démontrent qu'un enfant pointant du doigt l'énoncé présenté sur la tablette numérique obtiendra le même résultat que dans le cas où celui-ci n'utiliserait pas de ses doigts pour pointer. En effet, la valeur p associée à la variable binaire associée à l'action de pointer («pointer») s'élève à 0,134 et est de ce fait non significative. Ainsi, *l'action de pointer ne favorise donc en rien la performance de l'apprenant.*

##### Action de compter durant la tâche («compter»)

Nos résultats concernant le dénombrement ne sont pas plus concluants. En effet, contrairement à notre idée selon laquelle le fait de compter augmenterait la performance, nos données présentent la variable relative à l'événement («compter») non significative, avec une valeur p égale à 0,4515

(Tableau des résultats 3). Ainsi, *tout comme le geste de pointer, l'acte de compter n'améliorerait pas la performance de l'enfant.*

### Interruption lors du dénombrement («interruption\_compter»)

Il apparaît cependant qu'un enfant s'interrompant lorsqu'il compte se verrait obtenir un score moins élevé que s'il ne s'interrompait pas en comptant. En effet, la valeur p de la variable concernée est significative, égale à 0,040 (Tableau des résultats 9) et le Beta est négatif et égal à -2,2477.

Logistic regression Number of obs = 165 Wald chi2(1) = 0,56 Prob > chi2 = 0,4549 Log pseudolikelihood = -88,871838 Pseudo R2 = 0,0019					Logistic regression Number of obs = 165 Wald chi2(3) = 4,06 Prob > chi2 = 0,2549 Log pseudolikelihood = -86,150938 Pseudo R2 = 0,0325			
Performance	Coef.	Std.Err.	z	P> z	Coef.	Std.Err.	z	P> z
Ecart-type_pupillaire	0,1233	0,1650	0,7500	0,2275	0,0580	0,1518	0,3800	0,3515
Pointer					-0,6811	0,9565	-0,7100	0,238
Interruption_Compter					-2,2477	1,2809	-1,7500	0,0395
_cons	0,3620	1,0441	0,3500	0,3645	0,9133	0,9074	1,0100	0,1570

Niveau de significativité du test unilatéral

**Tableau des résultats 9 - effets de l'interruption lors du dénombrement sur la performance**

*Ainsi, une interruption prolongée lors d'un dénombrement nuit à la performance de l'apprenant.*

### Durée du dénombrement durant la tâche («duree\_compter»)

Il s'agit maintenant de savoir si la durée du dénombrement impacte à la hausse la performance d'un enfant. La relation est non significative (valeur p égale à 0,497, Tableau des résultats 10). Ainsi, *qu'un enfant compte durant un laps de temps très court ou plus longuement n'impacte en rien sa performance.*

Logistic regression Number of obs = 165 Wald chi2(1) = 0,56 Prob > chi2 = 0,4549 Log pseudolikelihood = -88,871838 Pseudo R2 = 0,0019					Logistic regression Number of obs = 165 Wald chi2(3) = 1,16 Prob > chi2 = 0,7638 Log pseudolikelihood = -88,288043 Pseudo R2 = 0,0085			
Performance	Coef.	Std.Err.	z	P> z	Coef.	Std.Err.	z	P> z
Ecart-type_pupillaire	0,1233	0,1650	0,7500	0,2275	0,0668	0,1634	0,4100	0,3415
Pointer					-0,905	0,8503	-1,060	0,1435
Duree_compter					0,0013	0,1813	0,0100	0,4973
Ecart-type_pupillaire_pointer								
Ecart-type_pupillaire_duree_compter								
_cons	0,3620	1,0441	0,3500	0,3645	0,7947	1,1009	0,7200	0,2350

Niveau de significativité du test unilatéral

**Tableau des résultats 10 - effets de la durée du dénombrement sur la performance**

Les résultats obtenus lorsqu'il s'agissait de tester l'ensemble des mesures en répondant à l'hypothèse 4 vous sont présentés de manière visuelle via la figure 10 ci-dessous.

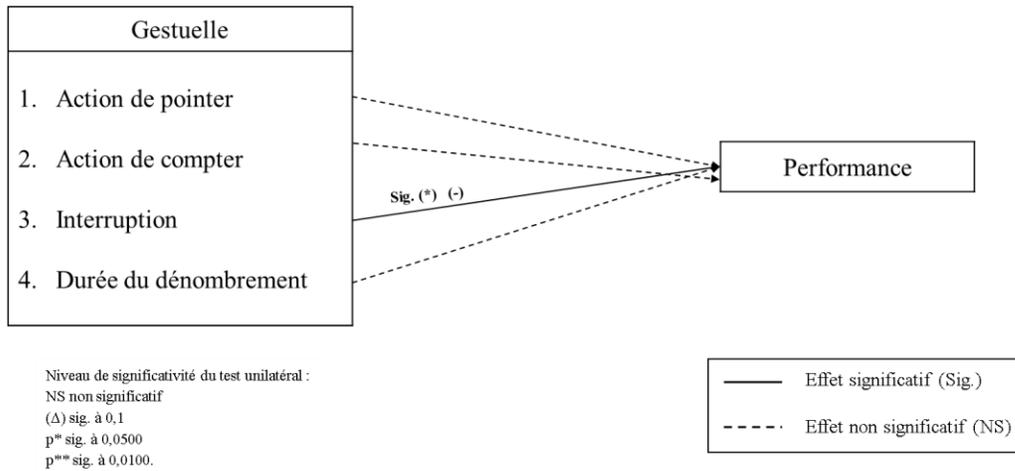


Figure 9 - Synthèse des résultats de l'hypothèse 4 (H4)

En somme, l'action de pointer ou de compter n'a aucun effet significatif sur la performance de l'apprenant. La durée du dénombrement n'impacte pas plus le score obtenu par l'enfant. Seule une interruption moindrement prolongée (temps d'arrêt marqué) lors du décompte impacte négativement les résultats du sujet.

Ainsi, **H4** : «*La gestuelle est positivement liée à la performance de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique*» est *partiellement supportée*.

#### 4.3.5 H5 : L'utilisation de la gestuelle diminuera l'impact de la difficulté sur la charge cognitive de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.

Cette hypothèse répond à notre second objectif de recherche, à savoir : la gestuelle a-t-elle un *effet modérateur* sur notre construit théorique : difficulté – charge cognitive – performance?

Dans un premier temps, veuillez trouver la synthèse de nos résultats associés à H5 (figure 11), avant de découvrir nos analyses (détaillées) pour chacune des variables considérées dans le cadre de notre étude.

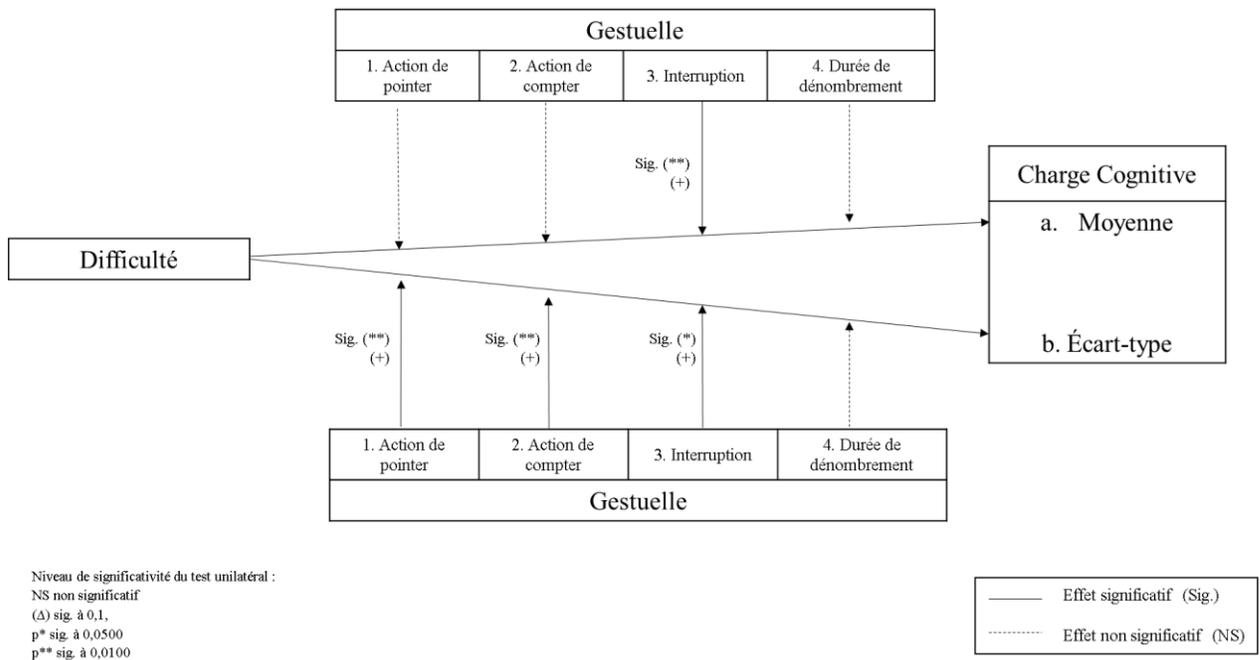


Figure 10 – H5 : Synthèse des effets modérateurs de nos mesures de gestuelle sur la relation entre difficulté et charge cognitive

On rappelle que les effets modérateurs des variables binaires (dummy) de notre modèle (action de pointer, action de compter et interruption lors du décompte) nécessitent un traitement particulier si l'on veut étudier leurs effets sur la relation entre une variable binaire et une variable continue.

Tel qu'explicité dans la section 3.8.2, nous utiliserons donc une matrice d'analyse telle que celle présentée ci-dessous (tableau 13) pour trois des quatre variables comportementales testées.

		Critère x (variable dummy étudiée)	
		Évènement ne se produit pas (= 0)	Évènement se produit (= 1)
Difficulté («niveau_difficulté»)	Facile (= 0)	(0,0)	(0,1)
	Difficile (= 1)	(1,0)	(1,1)

Tableau 13 – Matrice d'analyse des résultats

Enfin, pour répondre à notre objectif de recherche, nous testerons la modulation de nos variables sur l'effet de la difficulté sur la moyenne ainsi que sur l'écart-type pupillaire.

### 4.3.5.1 Moyenne du diamètre pupillaire

Attardons-nous donc, dans un premier temps, sur l'effet de la difficulté sur la moyenne du diamètre pupillaire.

Effet modérateur de l'action de pointer durant la tâche («pointer»)

Veuillez trouver les données relatives à l'activité de pointer durant la tâche («Comport\_Pointer») ainsi que les différents résultats des combinaisons visant à tester son impact modérateur sur la moyenne du diamètre pupillaire dans les tableaux des résultats présentés ci-dessous (tableaux des résultats 11).

Comparaisons groupes 01, 10, et 11 avec groupe omis : 00

Number of obs = 169 F( 2, 9) = 2.78 Prob > F = 0.1149 R-squared = 0.0150 Root MSE = .43479				
m_Pupil	Coef.	Std.Err.	t	P> t
niveau_difficulté_Pointer_01	-0,1232122	0,1190373	-1,04	0,1640
niveau_difficulté_Pointer_10	0,1023358	0,0434178	2,36	0,0215
niveau_difficulté_Pointer_11	0	(omitted)		0
_cons	4,075501	0,1323422	30,8	0,0000

Niveau de significativité du test unilatéral

Comparaisons groupes 00, 10 et 11 avec groupe omis : 01

Number of obs = 169 F(29) = 2.78 Prob>F = 0.1149 R-squared = 0.0150 Root MSE = .43479				
m_Pupil	Coef.	Std.Err.	t	P> t
niveau_difficulté_Pointer_00	0,1232122	0,1190373	1,04	0,1640
niveau_difficulté_Pointer_10	0,225548	0,1434581	1,57	0,0750
niveau_difficulté_Pointer_11	0	(omitted)		0
_cons	3,952289	0,1407603	28,08	0,0000

Niveau de significativité du test unilatéral

Tableau des résultats 11 - tests effet modérateur de l'action de pointer sur la relation difficulté-moyenne pupillaire

#### ✓ Impact de l'action de pointer dans un contexte de question facile

Si l'on se réfère à notre matrice d'analyse des résultats (tableau 13), nous comparons en réalité ici les résultats de moyenne pupillaire pour les combinaisons (0,0) vs. (0,1).

On observe une valeur p égale à 0,164 non significative. Ainsi, dans un contexte de question facile, *le fait de pointer n'a aucun effet modérateur sur la moyenne du diamètre pupillaire.*

#### ✓ Impact de l'action de pointer dans un contexte de question difficile

Il s'agit, dans ce cas de figure, de comparer les résultats des moyennes pupillaires pour les combinaisons (1,0) vs. (1,1).

Résultat pertinent obtenu : aucun participant ne se trouve dans le groupe (1,1). Autrement dit, *aucun sujet n'a utilisé ses doigts pour pointer dans un contexte de question difficile*. Aucune valeur n'est obtenue pour ces combinaisons.

✓ *Effet modérateur de comparaisons croisées de groupes*

Nous comparons les groupes (0,1) avec (1,0). En d'autres termes, il s'agit de savoir s'il existe une différence significative entre la moyenne pupillaire des enfants usant de leurs doigts pour pointer dans un contexte de problème facile et des enfants ne pointant pas dans un contexte de problème difficile.

On observe une valeur p égale à 0,075, significative (bien que marginalement). Ainsi, *une différence de moyenne pupillaire est significative entre un groupe usant de ses doigts pour compter dans un contexte de problème facile et le second, résolvant un problème difficile et n'usant pas de leur index pour pointer*.

Finalement, la comparaison des groupes (0,0) vs. (1,1) ne nous indique aucun résultat au vu de l'absence de sujet se trouvant dans le groupe (1,1) comme énoncé précédemment.

Veillez trouver une synthèse des valeurs de la valeur p associée à chacune des combinaisons testées précédemment dans le tableau suivant :

<b>Variable : «pointer»</b>	
<b>Principales Combinaisons</b>	<b>valeur p</b>
Contexte de question facile (0,0) vs. (0,1)	0,164 (NS)
Contexte de question difficile (1,0) vs. (1,1)	Valeur omise
Effet croisé (0,1) vs. (1,0)	0,075 (Δ)
Effet croisé (0,0) vs. (1,1)	Valeur omise

Niveau de significativité du test unilatéral :  
 NS non significatif  
 (Δ) sig. à 0,1,  
 p\* sig. à 0,0500  
 p\*\* sig. à 0,0100

En somme, *l'action de pointer ne modère pas l'impact de la difficulté sur la moyenne du diamètre pupillaire*. Les résultats ayant trait à l'effet modérateur de l'usage des doigts pour pointer étant maintenant étudiés, penchons-nous sur les résultats relatifs à notre variable de dénombrement.

Effet modérateur de l'action de compter durant la tâche («compter»)

Veillez trouver les données relatives à l'action de compter ainsi que les différents résultats des combinaisons visant à tester son impact modérateur sur la moyenne du diamètre pupillaire.

Comparaisons groupes 01, 10, et 11 avec groupe omis : 00

Number of obs = 169 F( 3, 9) = 2.34 Prob > F = 0.1413 R-squared = 0.0200 Root MSE = .43498				
m_Pupil	Coef.	Std.Err.	t	P> t
niveau_difficulté_Compter_01	-0,1025718	0,1488534	-0,69	0,2540
niveau_difficulté_Compter_10	0,105141	0,0435105	2,42	0,0195
niveau_difficulté_Compter_11	0,0449575	0,1935624	0,23	0,4110
_cons	4,091325	0,1400292	29,22	0,0000

Niveau de significativité du test unilatéral

Comparaisons groupes 00, 10, et 11 avec groupe omis : 01

Number of obs = 169 F( 3, 9) = 2.34 Prob > F = 0.1413 R-squared = 0.0200 Root MSE = .43498				
m_Pupil	Coef.	Std.Err.	t	P> t
niveau_difficulté_Compter_00	0,1025718	0,1488534	0,69	0,2540
niveau_difficulté_Compter_10	0,2077128	0,1767165	1,18	0,1350
niveau_difficulté_Compter_11	0,1475293	0,1058316	1,39	0,0985
_cons	3,988753	0,155313	25,68	0,0000

Niveau de significativité du test unilatéral

Comparaisons groupes 00, 01, et 10 avec groupe omis : 11

Number of obs = 169 F( 3, 9) = 2.34 Prob > F = 0.1413 R-squared = 0.0200 Root MSE = .43498				
m_Pupil	Coef.	Std.Err.	t	P> t
niveau_difficulté_Compter_00	-0,0449575	0,1935624	-0,23	0,4110
niveau_difficulté_Compter_01	-0,1475293	0,1058316	-1,39	0,0985
niveau_difficulté_Compter_10	0,0601835	0,2116444	0,28	0,3915
_cons	4,136282	0,2288985	18,07	0,0000

Niveau de significativité du test unilatéral

**Tableau des résultats 12 - tests effet modérateur de l'action de compter sur la relation difficulté-moyenne pupillaire**

✓ *Impact de l'utilisation de ses doigts pour compter dans un contexte de question facile*

L'on compare toujours les groupes (0,0) vs. (0,1). On observe une valeur p égale à 0,254, non significative. Ainsi, dans un contexte de question facile, le fait de compter sur ses doigts durant la tâche n'a aucun effet modérateur sur la moyenne du diamètre pupillaire. Qu'en est-il lorsque la question est cette fois-ci difficile?

✓ *Impact de l'utilisation de ses doigts pour compter dans un contexte de question difficile*

On compare donc les moyennes du diamètre pupillaire observées pour les groupes (1,0) et (1,1). On observe alors une valeur p égale à 0,392, non significative, indiquant qu'aucune différence

significative n'était démontrée entre les moyennes pupillaires des deux groupes. Ainsi, *aucun effet de modulation n'est démontré lorsque l'enfant compte dans un contexte de question difficile.*

✓ *Effet modérateur de comparaisons croisées de groupes*

On s'intéresse ici aux groupes (0,1) et (1,0). En d'autres termes, il s'agit de savoir s'il existe une différence significative entre la moyenne pupillaire des enfants usant de leurs doigts pour compter dans un contexte de problème facile et des enfants ne comptant pas dans un contexte de problème difficile. Or on observe une valeur p égale à 0,135, non significative. *Ce dernier résultat nous laisse présager qu'aucun effet de modulation n'existe.*

De plus, les résultats obtenus lorsque l'on compare les groupes d'enfants ne comptant pas dans un contexte de question facile, et ceux comptant dans un contexte de résolution difficile ne révèlent aucun effet modérateur. En effet, on observe une valeur p égale à 0,411, non significative *relatant l'inexistence d'un quelconque effet de modulation.*

Veillez trouver une synthèse des valeurs de la valeur p associée à chacune des combinaisons testées précédemment dans le tableau suivant :

<b>Variable : «Compter»</b>	
<b>Principales Combinaisons</b>	<b>valeur p</b>
Contexte de question facile (0,0) vs. (0,1)	0,254 (NS)
Contexte de question difficile (1,0) vs. (1,1)	0,392 (NS)
Effet croisé (0,1) vs. (1,0)	0,135 (NS)
Effet croisé (0,0) vs. (1,1)	0,411 (NS)

Niveau de significativité du test unilatéral :  
 NS non significatif  
 (Δ) sig. à 0,1,  
 p\* sig. à 0,0500  
 p\*\* sig. à 0,0100

Il semblerait donc que *l'action de compter ne modère pas l'impact de la difficulté sur la moyenne du diamètre pupillaire.*

Effet modérateur de l'interruption lors du dénombrement  
 («interruption\_compter»)

Veillez trouver les données relatives à l'interruption dans le cas où l'enfant compterait, ainsi que les différents résultats des combinaisons visant à tester son impact modérateur sur la moyenne du diamètre pupillaire

**Comparaisons groupes 01, 10, et 11 avec groupe omis : 00**

Number of obs = 169 F( 2, 9) = . Prob > F = . Root MSE = .42866				
m_Pupil	Coef.	Std.Err.	t	P> t
niveau_difficulté_interruption_compter_01	-0,2512414	0,1463085	-1,72	0,0600
niveau_difficulté_interruption_compter_10	0,079359	0,0413908	1,92	0,0435
niveau_difficulté_interruption_compter_11	1,080355	0,1321996	8,17	0,0000
_cons	4,074645	0,1321996	30,82	0,0000

Niveau de significativité du test unilatéral

**Comparaisons groupes 00, 10, et 11 avec groupe omis : 01**

Number of obs = 169 F( 2, 9) = . Prob > F = . R-squared = 0.0483 Root MSE = .42866				
m_Pupil	Coef.	Std.Err.	t	P> t
niveau_difficulté_interruption_compter_00	0,2512414	0,1463085	1,72	0,0600
niveau_difficulté_interruption_compter_10	0,3306004	0,1569611	2,11	0,0320
niveau_difficulté_interruption_compter_11	1,331597	0,1169723	11,38	0,0000
_cons	3,823404	0,1169723	32,69	0,0000

Niveau de significativité du test unilatéral

**Comparaisons groupes 00, 01, et 10 avec groupe omis : 11**

Number of obs = 169 F( 3, 9) = 53.35 Prob > F = 0.0000 R-squared = 0.0483 Root MSE = .42866				
m_Pupil	Coef.	Std.Err.	t	P> t
niveau_difficulté_interruption_compter_00	-1,080355	0,1321996	-8,17	0,0000
niveau_difficulté_interruption_compter_01	-1,331597	0,1169723	-11,38	0,0000
niveau_difficulté_interruption_compter_10	-1,000996	0,1439551	-6,95	0,0000
_cons	5,155	3,78E-07	1,40E+07	0,0000

Niveau de significativité du test unilatéral

**Tableau des résultats 13 – tests effet modérateur de l'interruption lors du dénombrement sur la relation difficulté-moyenne pupillaire**

✓ *Impact de l'interruption lors du dénombrement dans un contexte de question facile*

Il s'agit de déceler l'impact modérateur d'une interruption lors d'un décompte dans un contexte de question facile, en comparant le groupe (0,0) ne s'interrompant pas et le groupe (0,1) s'interrompant. On observe alors une valeur p égale à 0,060, significative. Ainsi, *dans un contexte de question facile, s'interrompt lorsque l'on compte modifie (bien que marginalement) la moyenne du diamètre pupillaire.*

✓ *Impact de l'interruption lors du dénombrement dans un contexte de question difficile*

Dans un contexte de résolution de problème difficile, on observe une valeur  $p$  égale à 0,000, significative. Ainsi, dans un contexte de problème difficile, un enfant s'interrompant lorsqu'il compte (groupe (1,1)) aura une moyenne pupillaire plus élevée qu'un enfant ne s'interrompant pas (groupe (1,0)), avec un bêta négatif (-1.001) et significatif. En d'autres termes, *le fait de s'interrompre lorsque la question posée est difficile viendra augmenter la moyenne du diamètre pupillaire, et donc la charge cognitive de l'enfant.*

✓ *Effet modérateur de comparaisons croisées de groupes*

On s'intéresse alors aux groupes (0,1) et (1,0). En d'autres termes, il s'agit de savoir s'il existe une différence significative entre la moyenne pupillaire des enfants s'interrompant lorsqu'ils comptent dans un contexte de problème facile et des enfants ne s'interrompant pas dans un contexte de problème difficile. Il s'avère que l'on observe une valeur  $p$  égale à 0,032, significative. Ce dernier résultat nous laisse présager que *lorsque la question est difficile, un enfant ne s'interrompant pas aura une moyenne pupillaire plus élevée qu'un enfant s'interrompant dans un contexte facile*, avec un bêta positif (0,3306).

De plus, les résultats obtenus lorsque l'on compare les groupes d'enfants ne s'interrompant pas lorsque le problème est facile (groupe (0,0)), et ceux s'interrompant dans un contexte de résolution difficile (groupe (1,1)) nous démontrent qu'il existe bel et bien une différence de moyenne pupillaire entre les deux groupes. En effet, on observe une valeur  $p$  égale à 0,000, significative. *Lorsque la question posée est facile, un enfant ne s'interrompant pas de compter aura une moyenne pupillaire plus faible qu'un enfant qui s'interrompra dans un contexte difficile*, avec un bêta positif (1.0800) et significatif.

Or ces derniers résultats (comparaisons croisées) n'isolent aucun des deux facteurs : difficulté ou gestuelle (interruption). Formulé différemment, il nous est impossible de savoir si l'on doit attribuer cette différence de moyenne pupillaire à la difficulté de la question, ou au fait de s'être interrompu lors du décompte durant la tâche. Présenté de manière graphique dans la figure présentée ci-dessous (figure 12), un effet de modulation dû à l'interruption existe et est visible.

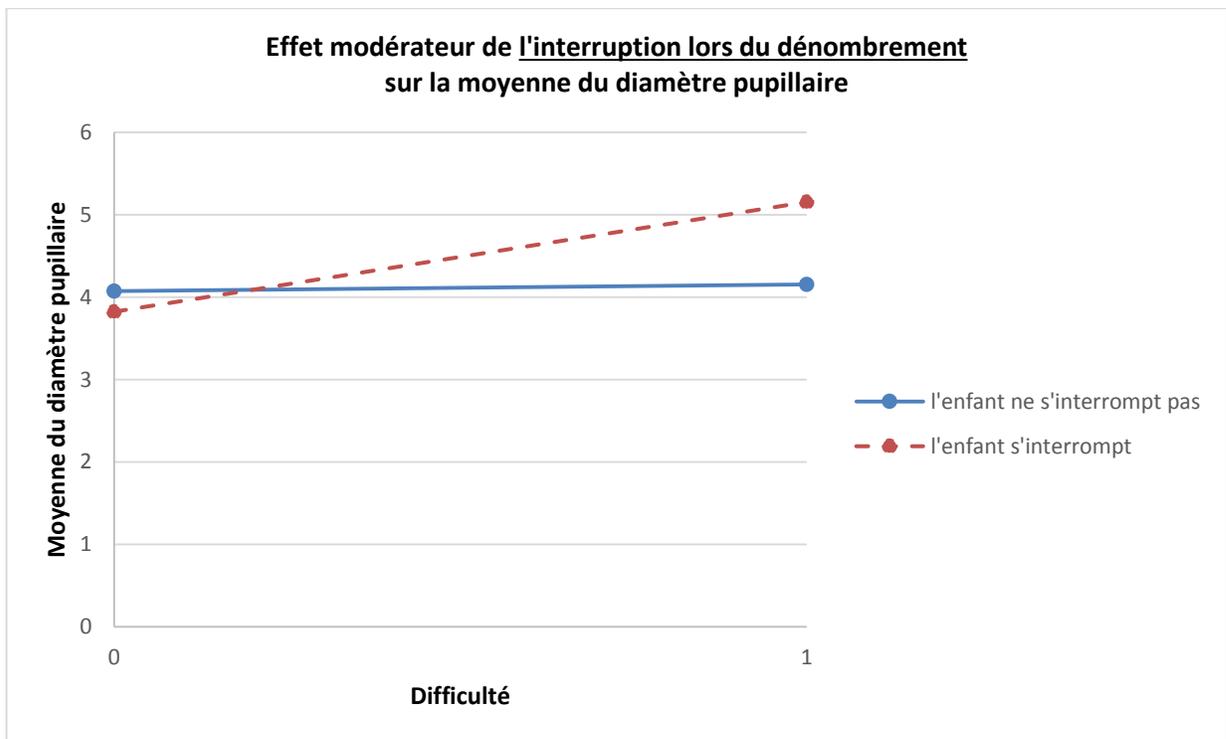


Figure 11 – H5 : Graphique - Effet modérateur de l'interruption lors du dénombrement sur la moyenne pupillaire

Veillez trouver une synthèse des valeurs de la valeur p associées à chacune des combinaisons testées précédemment dans le tableau suivant :

Variable : «Interruption_compter»	
Principales Combinaisons	valeur p
Contexte de question facile (0,0) vs. (0,1)	0,060 (Δ)
Contexte de question difficile (1,0) vs. (1,1)	0,000 (Sig.**)
Effet croisé (0,1) vs. (1,0)	0,032 (Sig.*)
Effet croisé (0,0) vs. (1,1)	0,000 (Sig.**)

Niveau de significativité du test unilatéral :  
 NS non significatif  
 (Δ) sig. à 0,1,  
 p\* sig. à 0,0500  
 p\*\* sig. à 0,0100

En somme, *une interruption moins prolongée lors du dénombrement a effectivement un effet modérateur sur la relation entre la difficulté et la moyenne du diamètre pupillaire de l'enfant (H5).*

Terminons de tester nos mesures liées à la gestuelle quant à leur impact modérateur sur la moyenne pupillaire en présentant les résultats de notre mesure de durée du dénombrement pendant la tâche.

Effet modérateur de la durée du dénombrement durant la tâche («duree\_compter»)

Quant à l'effet potentiellement modérateur de la durée du dénombrement, celui-ci se voit non significatif. En effet, la variable associée «Niveau\_difficulte\_Duree\_compter» affiche une valeur p égale à 0,156 non significative (Tableau des résultats 14).

Linear regression Number of obs = 169				
F( 4, 9) = 1.35				
Prob > F = 0,3235				
R-squared = 0,0191				
Root MSE = ,43651				
Moy_pupillaire	Coef.	Std.Err.	t	P> t
Niveau_difficulte	0,0861	0,0493	1,7400	0,0575
Pointer	-0,1253	0,1279	-0,9800	0,1765
Duree_compter	-0,0292	0,0629	-0,4600	0,3265
Niveau_difficulte_duree_compter	0,0290	0,0270	1,0700	0,1555
_cons	4,0920	0,1399	29,2500	0,0000

Niveau de significativité du test unilatéral

**Tableau des résultats 14 - effet modérateur de la durée de dénombrement sur la relation difficulté-moyenne pupillaire**

En somme, *la durée propre au dénombrement d'un enfant lorsque celui-ci répond à une question précise n'affecte en rien l'impact de la difficulté sur la moyenne du diamètre pupillaire lorsque l'on contrôle pour la difficulté.*

Tâchons maintenant de nous pencher sur les résultats impliquant non plus la moyenne, mais *l'écart-type* du diamètre pupillaire. Nous reprendrons donc nos hypothèses en veillant à substituer les deux variables.

#### 4.3.5.2 Écart-type du diamètre pupillaire

Intéressons-nous maintenant (et de la même manière que présentée dans la sous-section précédente), aux effets modérateurs des trois premières variables de notre modèle (binaires), en utilisant le même cadre théorique (tableau 13) représentant les différents scénarii à tester.

Effet modérateur de l'action de pointer durant la tâche («pointer»)

Veillez trouver les données relatives à l'action de pointer du doigt durant la tâche ainsi que les différents résultats des combinaisons visant à tester son impact modérateur sur l'écart-type du diamètre pupillaire.

Comparaisons groupes 01, 10, et 11 avec groupe omis : 00

Number of obs = 165 F( 2, 9) = 5.27 Prob > F = 0.0305 R-squared = 0.0142 Root MSE = .11331				
sd_Pupil	Coef.	Std.Err.	t	P> t
niveau_difficulté_Pointer_01	-0,0673758	0,021381	-3,15	0,0060
niveau_difficulté_Pointer_10	-0,0028621	0,0141929	-0,2	0,4225
niveau_difficulté_Pointer_11	0	(omitted)		0
_cons	0,1349228	0,011784	11,45	0,0000

Niveau de significativité du test unilatéral

Comparaisons groupes 00, 10, et 11 avec groupe omis : 01

Number of obs = 165 F( 2, 9) = 5.27 Prob > F = 0.0305 R-squared = 0.0142 Root MSE = .11331				
sd_Pupil	Coef.	Std.Err.	t	P> t
niveau_difficulté_Pointer_00	0,0673758	0,021381	3,15	0,0060
niveau_difficulté_Pointer_10	0,0645136	0,0218024	2,96	0,0080
niveau_difficulté_Pointer_11	0	(omitted)		0
_cons	0,067547	0,0187575	3,6	0,0030

Niveau de significativité du test unilatéral

Comparaisons groupes 00, 01, et 10 avec groupe omis : 11

Number of obs = 165 F( 2, 9) = 5.27 Prob > F = 0.0305 R-squared = 0.0142 Root MSE = .11331				
sd_Pupil	Coef.	Std.Err.	t	P> t
niveau_difficulté_Pointer_00	0,0028621	0,0141929	0,2	0,4225
niveau_difficulté_Pointer_01	-0,0645136	0,0218024	-2,96	0,0080
niveau_difficulté_Pointer_10	0	(omitted)		0
_cons	0,1320606	0,0151093	8,74	0,0000

Tableau des résultats 15 – tests effet modérateur de l'action de pointer sur la relation difficulté-écart-type pupillaire

✓ *Impact de l'action de pointer dans un contexte de question facile*

Comparons les écarts type du diamètre pupillaire des groupes (0,0) et (0,1), c.-à-d. l'écart-type moyen des enfants ne pointant pas du doigt et celui des enfants pointant du doigt, dans un contexte de résolution aisée d'un problème. On observe une valeur p égale à 0,006 significative. Il s'avère donc que *dans le cas où le problème à résoudre n'est pas complexe, un enfant pointant du doigt aura une variance pupillaire moins élevée que lorsque celui-ci ne pointera pas*, avec (beta=0.0673) positif et significatif.

On assume donc que le fait de pointer a effectivement un effet modérateur sur l'écart-type du diamètre pupillaire, et non sur la moyenne du diamètre pupillaire comme énoncé dans la sous-section antérieure.

✓ *Impact de l'action de pointer dans un contexte de question difficile*

Quant à la comparaison des groupes (1,0) et (1,1), tout comme les tests de l'effet modérateur des variables dummy sur la moyenne du diamètre pupillaire présentés dans la sous-section précédente,

aucun sujet ne se trouve dans le groupe (1,1). Autrement dit, *aucun enfant n'a utilisé ses doigts pour pointer dans un contexte de question difficile*. Aucune valeur n'est obtenue pour ces combinaisons.

✓ *Effet modérateur de comparaisons croisées de groupes*

Nous comparons les groupes (0,1) avec (1,0). En d'autres termes, il s'agit de savoir s'il existe une différence significative entre l'écart-type pupillaire des enfants usant de leurs doigts pour pointer dans un contexte de problème facile et des enfants ne pointant pas dans un contexte de problème difficile. La valeur p observée est égale à 0,008, significative et bêta positif égal à 0,0645. Ceci signifie que *dans un contexte difficile, un enfant ne pointant pas du doigt aura une variance pupillaire plus élevée que l'enfant qui utilisera ses doigts pour pointer dans un contexte facile*. Ainsi, l'acte de pointer a un effet modérateur sur l'écart-type et non la moyenne pupillaire dans ce cas de figure ((0,1) vs. (1,0)).

Enfin, il nous est impossible d'obtenir quelque valeur pour la comparaison des groupes testés (0,0) vs. (1,1) puisque tel qu'énoncé ci-haut, aucun participant n'a pointé du doigt dans un contexte de résolution d'un problème complexe.

Veillez trouver une synthèse des valeurs de la valeur p associée à chacune des combinaisons testées précédemment sur l'écart-type pupillaire dans le tableau suivant, ainsi qu'un rappel des valeurs p obtenues quant à leur effet sur la moyenne pupillaire :

Variable : «pointer»		RAPPEL
Principales Combinaisons	valeur p (Écart-type pupillaire)	valeur p (moyenne pupillaire)
Contexte de question facile (0,0) vs. (0,1)	<b>0,006 (Sig.**)</b>	0,164 (NS)
Contexte de question difficile (1,0) vs. (1,1)	<b>Valeur omise</b>	Valeur omise
Effet croisé (0,1) vs. (1,0)	<b>0,008 (Sig.**)</b>	0,075 (Δ)
Effet croisé (0,0) vs. (1,1)	<b>Valeur omise</b>	Valeur omise

Niveau de significativité du test unilatéral :  
 NS non significatif  
 (Δ) sig. à 0,1  
 p\* sig. à 0,0500  
 p\*\* sig. à 0,0100

En somme, *l'action de pointer modère à la baisse l'impact de la difficulté sur l'écart-type du diamètre pupillaire*.

Intéressons-nous maintenant à l'effet potentiellement modérateur de l'utilisation de ses doigts pour compter sur la relation entre la difficulté et l'écart-type du diamètre pupillaire.

### Effet modérateur de l'action de compter durant la tâche («compter»)

Veillez trouver les données relatives à l'action de compter ainsi que les différents résultats des combinaisons visant à tester son impact modérateur sur l'écart-type du diamètre pupillaire.

Comparaisons groupes 01, 10, et 11 avec groupe omis : 00

Number of obs = 165 F( 3, 9) = 3.23 Prob > F = 0.0751 R-squared = 0.0254 Root MSE = .11301				
sd_Pupil	Coef.	Std.Err.	t	P> t
niveau_difficulté_Compter_01	-0,0320466	0,0267601	-1,2	0,1310
niveau_difficulté_Compter_10	0,0131442	0,0180297	0,73	0,2425
niveau_difficulté_Compter_11	-0,0465841	0,0219577	-2,12	0,0315
_cons	0,1383281	0,015143	9,13	0,0000

Niveau de significativité du test unilatéral

Comparaisons groupes 00, 10, et 11 avec groupe omis : 01

Number of obs = 165 F( 3, 9) = 3.23 Prob > F = 0.0751 R-squared = 0.0254 Root MSE = .11301				
sd_Pupil	Coef.	Std.Err.	t	P> t
niveau_difficulté_Compter_00	0,0320466	0,0267601	1,2	0,1310
niveau_difficulté_Compter_10	0,0451908	0,0182993	2,47	0,0180
niveau_difficulté_Compter_11	-0,0145376	0,0173628	-0,84	0,2120
_cons	0,1062816	0,0191854	5,54	0,0000

Niveau de significativité du test unilatéral

Comparaisons groupes 00, 01, et 10 avec groupe omis : 11

Number of obs = 165 F( 3, 9) = 3.23 Prob > F = 0.0751 R-squared = 0.0254 Root MSE = .11301				
sd_Pupil	Coef.	Std.Err.	t	P> t
niveau_difficulté_Compter_00	0,0465841	0,0219577	2,12	0,0315
niveau_difficulté_Compter_01	0,0145376	0,0173628	0,84	0,2120
niveau_difficulté_Compter_10	0,0597283	0,0199922	2,99	0,0075
_cons	0,091744	0,0172915	5,31	0,0000

Niveau de significativité du test unilatéral

### Tableau des résultats 16 – tests effet modérateur de l'action de compter sur la relation difficulté-écart-type pupillaire

✓ *Impact de l'utilisation de ses doigts pour compter dans un contexte de question facile*

Il s'avère que dans un contexte de résolution d'un problème simple, un enfant n'usant pas de ses doigts pour compter (groupe (0,0)) ne présentera pas de différence en termes d'écart-type pupillaire si on le compare à un enfant comptant sur ses doigts durant la tâche (groupe (0,1)). En effet, on observe une valeur p égale à 0,131, non significative. Ainsi, *dans un contexte de question facile, l'acte de compter n'a aucun effet modérateur* sur la relation entre la difficulté et l'écart-type du diamètre pupillaire.

✓ *Impact de l'utilisation de ses doigts pour compter dans un contexte de question difficile*

De plus, dans le cas où la question posée est difficile, on cherche à identifier si l'usage de ses doigts pour compter fait diminuer l'écart-type pupillaire pour le groupe en faisant usage (1,1) par rapport au groupe ne mobilisant pas leurs membres (1,0). On observe alors une valeur p égale à 0,008, significative et Beta positif égal à 0,0597. Ainsi, il existe une différence significative entre les écarts types des deux groupes, et *l'utilisation de ses doigts pour compter impacte à la baisse l'écart-type pupillaire dans un contexte de question difficile.*

✓ *Effet modérateur de comparaisons croisées de groupes*

On s'intéresse ici aux groupes (0,1) et (1,0). En d'autres termes, il s'agit de savoir s'il existe une différence significative entre l'écart-type pupillaire des enfants usant de leurs doigts pour compter dans un contexte de problème facile et des enfants ne comptant pas dans un contexte de problème difficile. On observe une valeur p égale à 0,018, significative et un bêta positif (0,045). En effet, dans un contexte de question facile, un enfant comptant avec ses doigts aura une variance pupillaire moins élevée qu'un enfant qui ne compte pas dans un contexte de question difficile.

De plus, les résultats obtenus lorsque l'on compare les groupes d'enfants ne comptant pas dans un contexte de question facile (groupe (0,0), et ceux comptant dans un contexte de résolution difficile (groupe (1,1) révèlent un effet modérateur. En effet, on observe une valeur p égale à 0,032, significative relatant l'existence d'un effet de modulation, avec un Beta de -0,0465).

Or comme nous l'indiquions pour la variable associée à l'interruption et son impact modérateur sur la relation entre la difficulté et la moyenne pupillaire, ces deux derniers résultats ne permettent pas d'isoler le facteur à l'origine de cette différence d'écart-type : est-ce dû à la difficulté de la question ou au fait de compter sur ses doigts?

Notre résultat à l'hypothèse 1 nous indique que la difficulté d'une question n'impactait pas l'écart-type du diamètre pupillaire. On en déduit donc que la différence significative observée dans notre cas de figure est due à l'usage de ses doigts pour compter. De plus, nos résultats présentés de manière visuelle dans la figure suivante (figure 13) corroborent notre propos, représentant l'effet modérateur de l'action de compter.

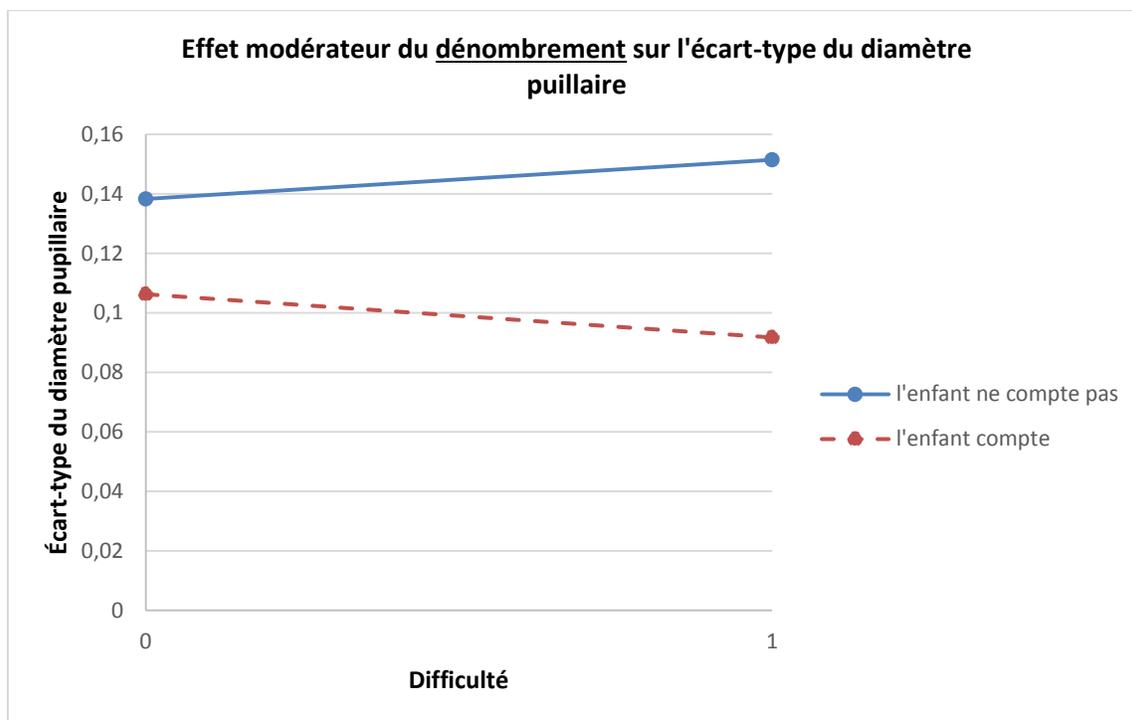


Figure 12 – H5 : Graphique – Effet modérateur du dénombrement («compter») sur l'écart-type du diamètre pupillaire

Veillez trouver une synthèse des valeurs p associées à chacune des combinaisons testées précédemment sur l'écart-type pupillaire dans le tableau suivant, ainsi qu'un rappel des valeurs p obtenues quant à l'effet sur la moyenne pupillaire :

Variable : «Compter»		RAPPEL
Principales Combinaisons	valeur p (Écart-type pupillaire)	valeur p (moyenne pupillaire)
Contexte de question facile (0,0) vs. (0,1)	<b>0,131 (NS)</b>	0,254 (NS)
Contexte de question difficile (1,0) vs. (1,1)	<b>0,008 (Sig.**)</b>	0,392 (NS)
Effet croisé (0,1) vs. (1,0)	<b>0,018 (Sig.*)</b>	0,135 (NS)
Effet croisé (0,0) vs. (1,1)	<b>0,032 (Sig.*)</b>	0,411 (NS)

Niveau de significativité du test unilatéral :  
 NS non significatif  
 p\* sig. à 0,0500  
 p\*\* sig. à 0,0100

En somme, l'utilisation de ses doigts pour compter modère à la baisse l'impact de la difficulté sur l'écart-type du diamètre pupillaire (H5).

Qu'en est-il de l'effet de l'interruption durant le décompte et de son effet modérateur sur la relation entre la difficulté et l'écart-type? Veuillez-vous référer à la section suivante nous rapportant les résultats répondant à cette question

### Effet modérateur de l'interruption lors du dénombrement («interruption\_compter»)

Veuillez trouver les données relatives à l'interruption durant la tâche ainsi que les différents résultats des combinaisons visant à tester son impact modérateur sur l'écart-type du diamètre pupillaire.

**Comparaisons groupes 01, 10 et 11 avec groupe omis : 00**

Number of obs = 165 F( 2, 9) = . Prob > F = . R-squared = 0.0046 Root MSE = .11421				
sd_Pupil	Coef.	Std. Err.	t	P> t
niveau_difficulté_interruption_compter_01	-0,0528019	0,0319261	-1,65	0,0665
niveau_difficulté_interruption_compter_10	0,0006109	0,0155811	0,04	0,4850
niveau_difficulté_interruption_compter_11	-0,0380771	0,012002	-3,17	0,0055
_cons	0,132417	0,012002	11,03	0,0000

Niveau de significativité du test unilatéral

**Comparaisons groupes 00, 10 et 11 avec groupe omis : 01**

Number of obs = 165 F( 2, 9) = . Prob > F = . R-squared = 0.0046 Root MSE = .11421				
sd_Pupil	Coef.	Std.Err.	t	P> t
niveau_difficulté_interruption_compter_00	0,0528019	0,0319261	1,65	0,0665
niveau_difficulté_interruption_compter_10	0,0534128	0,0271221	1,97	0,0400
niveau_difficulté_interruption_compter_11	0,0147247	0,0332153	0,44	0,3340
_cons	0,0796151	0,0332153	2,4	0,0200

Niveau de significativité du test unilatéral

**Comparaisons groupes 00, 01 et 10 avec groupe omis : 11**

Number of obs = 165 F( 3, 9) = 5.94 Prob > F = 0.0162 R-squared = 0.0046 Root MSE = .11421				
sd_Pupil	Coef.	Std.Err.	t	P> t
niveau_difficulté_interruption_compter_00	0,0380771	0,012002	3,17	0,0055
niveau_difficulté_interruption_compter_01	-0,0147247	0,0332153	-0,44	0,3340
niveau_difficulté_interruption_compter_10	0,038688	0,0158863	2,44	0,0190
_cons	0,0943398	9,86E-09	9,60E+06	0,0000

Niveau de significativité du test unilatéral

**Tableau des résultats 17 – tests effet modérateur de l'interruption lors du dénombrement sur la relation difficulté-écart-type pupillaire**

✓ *Impact de l'interruption lors du dénombrement dans un contexte de question facile*

Il s'agit de déceler l'impact modérateur d'une interruption lors d'un décompte dans un contexte de question facile, en comparant le groupe (0,0) ne s'interrompant pas et le groupe (0,1) s'interrompant. On observe alors une valeur p égale à 0,067 significative (bien que marginalement). Ainsi, *dans un contexte de question facile, s'interrompre lorsque l'on compte a un effet modérateur marginal sur l'écart-type du diamètre pupillaire.*

✓ *Impact de l'interruption lors du dénombrement dans un contexte de question difficile*

Dans un contexte de résolution de problème difficile, on observe une valeur p égale à 0,019, significative et Beta positif égal à 0,0386. Ainsi, dans un contexte de problème difficile, un enfant s'interrompant lorsqu'il compte (appartenant au groupe (1,1)) aura un écart-type pupillaire significativement différent d'un enfant ne s'interrompant pas (groupe (1,0)). *En d'autres termes, le fait de s'interrompre lorsque la question posée est difficile impactera à la hausse l'écart-type du diamètre pupillaire, et donc la charge cognitive de l'enfant.*

✓ *Effet modérateur de comparaisons croisées de groupes*

On s'intéresse alors aux groupes (0,1) et (1,0). En d'autres termes, il s'agit de savoir s'il existe une différence significative entre l'écart-type pupillaire des enfants s'interrompant lorsqu'ils comptent dans un contexte de problème facile et des enfants ne s'interrompant pas dans un contexte de problème difficile. Il s'avère que l'on observe une valeur p égale à 0,040, significative. Ce dernier résultat indique que *lorsque la question est difficile, un enfant ne s'interrompant pas aura un écart-type pupillaire plus élevé qu'un enfant s'interrompant dans un contexte facile*, avec un bêta positif (0.0534).

De plus, les résultats obtenus lorsque l'on compare les groupes d'enfants ne s'interrompant pas lorsque le problème est facile (groupe (0,0)), et ceux s'interrompant dans un contexte de résolution difficile (groupe (1,1)) nous démontrent qu'il existe bel et bien une différence d'écart-type pupillaire entre les deux groupes. En effet, on observe une valeur p égale à 0,006, significative. *Lorsque la question posée est facile, un enfant ne s'interrompant pas de compter aura un écart-type pupillaire plus faible qu'un enfant qui s'interrompra dans un contexte difficile*, avec un bêta négatif (-0.0380).

Or ces derniers résultats (comparaisons croisées) n'isolent toujours pas le facteur responsable de la différence d'écart-type entre les groupes. Formulé différemment, il nous est impossible de savoir si l'on doit attribuer cette différence d'écart-type à la difficulté de la question, ou au fait de s'être

interrompu lors du décompte durant la tâche. Présenté de manière graphique dans la figure présentée ci-dessous (figure 14), un effet de modulation dû à l'interruption existe et est bel et bien visible.

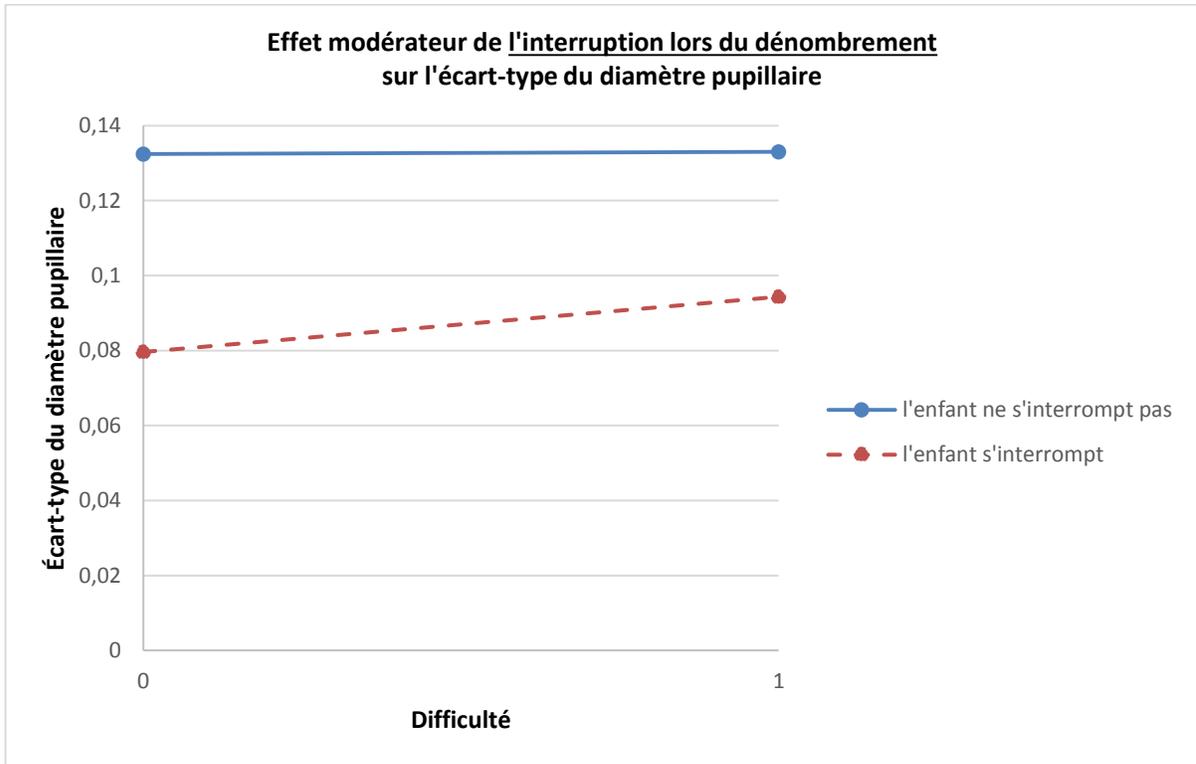


Figure 13 – H5 : Graphique – Effet modérateur de l'interruption lors du dénombrement («interruption\_compter») sur l'écart-type du diamètre pupillaire.

Veillez trouver une synthèse des valeurs de la valeur p associée à chacune des combinaisons testées précédemment dans le tableau suivant :

Variable : «Interruption_Compter»		RAPPEL
Principales Combinaisons	valeur p (Écart-type pupillaire)	valeur p (moyenne pupillaire)
Contexte de question facile (0,0) vs. (0,1)	<b>0,067 (Δ)</b>	0,060 (Δ)
Contexte de question difficile (1,0) vs. (1,1)	<b>0,019 (Sig.*)</b>	0,000 (Sig.**)
Effet croisé (0,1) vs. (1,0)	<b>0,040 (Sig.*)</b>	0,032 (Sig.*)
Effet croisé (0,0) vs. (1,1)	<b>0,006 (Sig.**)</b>	0,000 (Sig.**)

Niveau de significativité du test unilatéral :  
 NS non significatif  
 (Δ) sig. à 0,1,  
 p\* sig. à 0,0500  
 p\*\* sig. à 0,0100

En somme, *une interruption moins prolongée lors du dénombrement a effectivement un effet modérateur à la hausse sur la relation entre la difficulté et l'écart-type du diamètre pupillaire de l'enfant.*

Terminons de tester nos mesures liées à la gestuelle quant à leur impact modérateur sur l'écart-type pupillaire, en présentant les résultats de notre mesure de durée du dénombrement pendant la tâche.

#### Effet modérateur de la durée du dénombrement durant la tâche («duree\_compter»)

Enfin, l'effet potentiellement modérateur de la durée du dénombrement sur la relation entre la difficulté et l'écart-type pupillaire se voit non significatif. En effet, la variable associée «Niveau\_difficulte\_Duree\_Compter» affiche une valeur p égale à 0,259, non significative (Tableau des résultats 18).

Linear regression				
Number of obs = 165				
F( 4, 9) = 5,13				
Prob > F = 0,0197				
R-squared = 0,0372				
Root MSE = ,11267				
Ecart-type_pupillaire	Coef.	Std.Err.	t	P> t
Niveau_difficulte	0,0086	0,0179	0,4800	0,3210
Pointer	-0,0683	0,0264	-2,5800	0,0150
Duree_compter	-0,0114	0,0094	-1,2100	0,1285
Niveau_difficulte_Duree_compter	-0,0066	0,0097	-0,6700	0,2585
_cons	0,1414	0,0153	9,2400	0,0000

Niveau de significativité du test unilatéral

**Tableau des résultats 18 - effet modérateur de l'interruption lors du dénombrement sur la relation difficulté-écart-type pupillaire**

*La durée relative au dénombrement d'un enfant lorsque celui-ci répond à une question précise n'affecte en rien l'impact de la difficulté sur l'écart-type du diamètre pupillaire lorsque l'on contrôle la difficulté.* En d'autres termes, qu'un enfant compte longuement ou pas n'affecte en rien l'impact de la difficulté sur l'écart-type pupillaire.

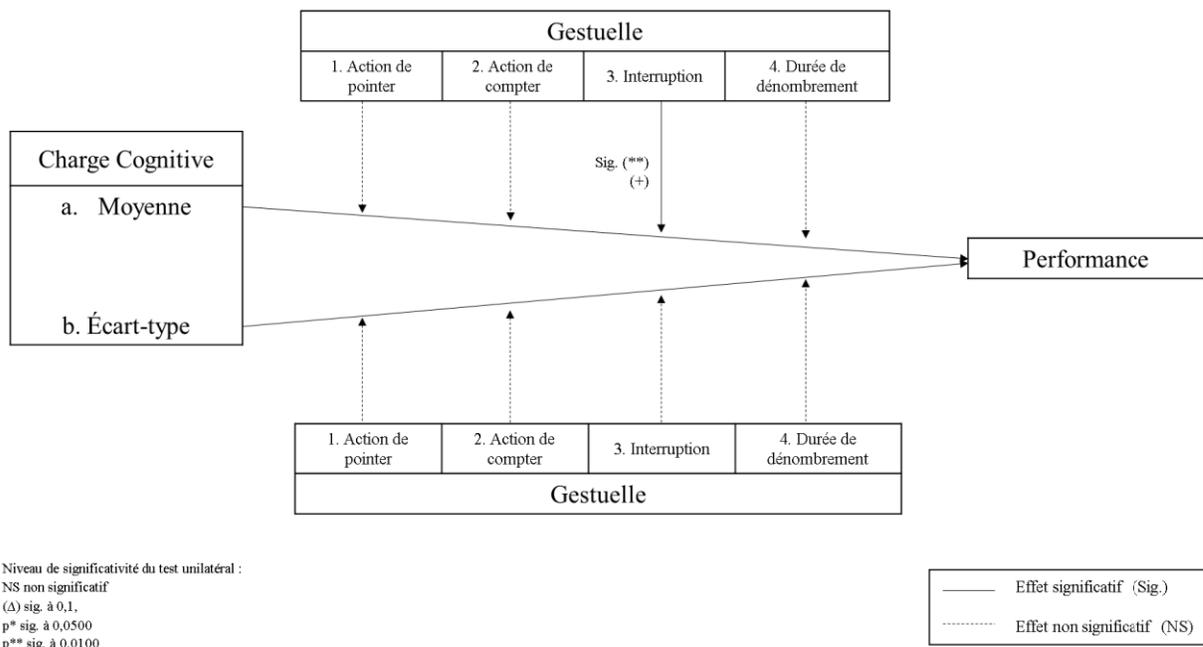
En somme, *les actions de pointer et de compter ont effectivement un effet modérateur (à la baisse) sur l'impact de la difficulté sur l'écart-type pupillaire, quand le fait de compter en s'interrompant modère à la hausse la relation difficulté – moyenne et écart-type pupillaires.* Enfin, il s'avère que *la durée du décompte lorsque l'enfant use de ses doigts pour compter n'a aucun effet modérateur, ni sur la relation niveau de difficulté-moyenne pupillaire, ni sur la seconde testée, c.-à-d. difficulté-écart-type pupillaire.* L'ensemble des résultats vous sont présentés en figure 11.

Somme toute, l'hypothèse

**H5 : «L'utilisation de la gestuelle diminuera l'impact de la difficulté sur la charge cognitive de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique»** est partiellement supportée.

#### 4.3.6 H6 : L'utilisation de la gestuelle diminuera l'impact de la charge cognitive sur la performance de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.

Nous postulons ici que la gestuelle modère la relation entre la charge cognitive et la performance d'un apprenant. Veuillez trouver l'ensemble de nos résultats présentés dans la figure ci-dessous (figure 15), quand les analyses détaillées de l'effet modérateur de chacune de nos variables liées à la gestuelle vous sont subséquentment présentées.



**Figure 14 – H6 : Synthèse des effets modérateurs de nos mesures de gestuelle sur la relation entre charge cognitive et performance**

Comme présenté jusqu'alors, nous veillerons à étudier l'impact de chacune de nos mesures opérationnalisant la dimension comportementale de notre modèle en nous référant à la moyenne pupillaire ainsi qu'à l'écart-type pupillaire, deux mesures associées à notre charge cognitive.

#### 4.3.6.1 Moyenne du diamètre pupillaire

Attardons-nous donc, dans un premier temps, sur l'effet de la difficulté sur la moyenne du diamètre pupillaire.

Effet modérateur de l'action de pointer durant la tâche («pointer»)

Logistic regression				
Number of obs = 169				
Wald chi2(5) = 3,46				
Prob > chi2 = 0,6300				
Log pseudolikelihood = -88,5098				
Pseudo R2 = 0,0174				
performance	Coef.	Std. Err.	z	P> z
moy_pupillaire	0,4226	0,5678	0,7400	0,2285
pointer	4,3304	11,2198	0,3900	0,3500
compter	-1,6413	4,2423	-0,3900	0,3495
moy_pupillaire_pointer	-1,3343	2,7656	-0,4800	0,3145
moy_pupillaire_Compter	0,4268	1,1165	0,3800	0,3510
_cons	-0,4481	2,4860	-0,1800	0,4285

Niveau de significativité du test unilatéral

Tableau des résultats 19 - effets modérateurs de l'action de pointer et l'action de compter sur la relation moyenne pupillaire-performance

Vous trouverez les résultats de l'effet modérateur de l'activité de pointer durant la tâche («moy\_pupillaire\_pointer») testé dans le Tableau des résultats 19. On observe une valeur p égale à 0,315, non significative. Notre premier résultat démontre donc que lorsqu'un enfant pointe du doigt (l'interface, un chiffre ...) durant la résolution d'un problème mathématique, la relation entre la moyenne pupillaire et la performance du sujet reste inchangée.

Quand est-il de l'utilisation de ses doigts pour compter?

Effet modérateur de l'action de compter durant la tâche («compter»)

Il s'avère que lorsqu'un enfant compte sur ses doigts, l'impact de sa moyenne pupillaire sur sa performance ne serait pas significativement différent que dans le cas où celui-ci ne compterait pas. En d'autres termes, on observe une valeur p égale à 0,351 (Tableau des résultats 19) variable «Moy\_pupillaire\_Compter») non significative, c.-à-d. que *l'action de compter ne modère pas l'impact de la moyenne pupillaire sur la performance d'un enfant.*

Par ailleurs, est-ce que le fait qu'un enfant s'interrompe en comptant durant une tâche impacte la relation entre sa moyenne pupillaire et sa performance?

## Effet modérateur de l'interruption lors du dénombrement («interruption\_compter»)

La réponse est positive. En effet, la variable testant la modulation de l'interruption sur la relation entre la moyenne pupillaire et la performance, «Moy\_pupillaire\_Interruption\_compter» présente une valeur p égale à 0,000, significative et un coefficient Beta positif (27,2398) (Tableau des résultats 20).

Logistic regression				
Number of obs = 169				
Wald chi2(5) = 592,28				
Prob > chi2 = 0,0000				
Log pseudolikelihood = -84,683818				
Pseudo R2 = 0,0598				
Performance	Coef.	Std. Err.	z	P> z
Moy_pupillaire	0,3652	0,5688	0,6400	0,2605
Pointer	2,7102	13,6386	0,2000	0,4210
Interruption_compter	-126,7210	11,1744	-11,3400	0,0000
Moy_pupillaire_Pointer	-0,8389	3,4357	-0,2400	0,4035
Moy_pupillaire_Interruption_compter	27,2398	2,3736	11,4800	0,0000
_cons	-0,1505	2,4283	-0,0600	0,4755

Niveau de significativité du test unilatéral

**Tableau des résultats 20 - effet modérateur de l'interruption lors du dénombrement sur la relation moyenne pupillaire-performance.**

*Ainsi, bien que l'action de compter ne soit pas significative quant à son effet modérateur sur la relation étudiée, l'interruption lors du dénombrement l'est et modère à la hausse notre relation.*

Découvrons alors si la durée du dénombrement durant la résolution d'un problème mathématique sur tablette numérique présente un effet modérateur sur le lien associé à notre hypothèse.

## Effet modérateur de la durée du dénombrement durant la tâche («duree\_compter»)

La variable testant la modulation de la durée du dénombrement durant la tâche sur la relation entre la moyenne pupillaire et la performance est présentée dans le Tableau des résultats 21 («Moy\_pupillaire\_Duree\_Compter») présente une valeur p égale à 0,154, non significative.

Logistic regression				
Number of obs = 169				
Wald chi2(5) = 7,38				
Prob > chi2 = 0,1941				
Log pseudolikelihood = -88,097183				
Pseudo R2 = 0,0219				
Performance	Coef.	Std. Err.	z	P> z
Moy_pupillaire	0,2732	0,6085	0,4500	0,3265
Pointer	3,6589	11,4543	0,3200	0,3745
Duree_Compter	-1,5133	1,4113	-1,0700	0,1420
Moy_pupillaire_Pointer	-1,1742	2,8217	-0,4200	0,3385
Moy_pupillaire_Duree_Compter	0,3736	0,3662	1,0200	0,1540
_cons	0,1909	2,6526	0,0700	0,4715

Niveau de significativité du test unilatéral

**Tableau des résultats 21 - effet modérateur de la durée du dénombrement sur la relation moyenne pupillaire-performance**

De là, on en déduit que *la durée du dénombrement n'a aucun effet modérateur sur la relation entre la moyenne pupillaire et la performance d'un enfant*, lorsque celui résout des problèmes mathématiques sur tablette numérique.

Reprenons maintenant chacun de nos tests, en substituant la moyenne pupillaire à l'écart-type pupillaire.

#### 4.3.6.2 Écart-type du diamètre pupillaire

Nous reprenons ici notre hypothèse, et testons donc chacune de nos variables afin de déceler leur impact sur l'écart-type pupillaire.

Effet modérateur de l'action de pointer durant la tâche («pointer»)

Les résultats de l'effet modérateur de l'activité de pointer durant la tâche («Ecart-type\_pupillaire\_Pointer») testée sont présentés dans le Tableau des résultats 22. On observe une valeur p égale à 0,497, non significative.

Logistic regression				
Number of obs = 165				
Wald chi2(5) = 1,60				
Prob > chi2 = 0,9011				
Log pseudolikelihood = -88,104469				
Pseudo R2 = 0,0105				
Performance	Coef.	Std.Err.	z	P> z
Ecart-type_pupillaire	0,1500	0,2184	0,6900	0,2460
Pointer	-0,8134	4,1653	-0,2000	0,4225
Compter	2,0320	2,2167	0,9200	0,1795
Ecart-type_pupillaire_Pointer	-0,0053	0,6588	-0,0100	0,4970
Ecart-type_pupillaire_Compter	-0,2909	0,3141	-0,9300	0,1770
_cons	0,1989	1,4319	0,1400	0,4450

Niveau de significativité du test unilatéral

**Tableau des résultats 22 - effets modérateurs de l'action de pointer et de l'action de compter sur la relation écart-type pupillaire-performance.**

*Ainsi, le fait de pointer du doigt n'a ni d'effet modérateur sur la relation entre l'écart-type et la performance ni sur l'impact de la moyenne pupillaire sur la performance (voir précédemment).*

Obtient-on des résultats similaires pour le fait de compter en utilisant ses doigts?

Effet modérateur de l'action de compter durant la tâche («compter»)

Les résultats présentés dans le Tableau des résultats 22 nous indiquent que la variable «Ecart-type\_pupillaire\_Compter» suit la même tendance. En effet, sa valeur p associée est égale à 0,177, et est de ce fait non significative.

*Ainsi, de même que pour le geste de pointer, celui de compter avec ses doigts n'a aucun effet modérateur sur l'impact de la charge cognitive sur la performance de l'apprenant, si l'on considère l'écart-type ou la moyenne pupillaire.*

Effet modérateur de l'interruption lors du dénombrement («interruption\_compter»)

Quant à notre mesure relative au fait que l'enfant s'interrompt lorsque ce dernier compte, son effet modérateur sur la relation considérée (écart-type pupillaire - performance) est inexistant. En effet, la variable opérationnalisant notre propos est «Ecart-type\_pupillaire\_Interruption\_Compter» et affiche une valeur p égale à 0,284 > 0,1, non significative (Tableau des résultats 23).

Logistic regression				
Number of obs = 165				
Wald chi2(5) = 7,89				
Prob > chi2 = 0,1626				
Log pseudolikelihood = -86,046208				
Pseudo R2 = 0,0336				
Performance	Coef.	Std.Err.	z	P> z
Ecart-type_pupillaire	0,0386	0,1860	0,2100	0,4180
Pointer	-1,3222	4,4578	-0,3000	0,3835
Interruption_Compter	-8,5471	10,4080	-0,8200	0,2060
Ecart-type_pupillaire_Pointer	0,1145	0,7410	0,1500	0,4385
Ecart-type_pupillaire_Interruption_compter	0,9396	1,6474	0,5700	0,2840
_cons	1,0446	1,0631	0,9800	0,1630

Niveau de significativité du test unilatéral

**Tableau des résultats 23 - effet modérateur de l'interruption lors du dénombrement sur la relation écart-type pupillaire-performance.**

Ainsi, contrairement au résultat de notre variable obtenu précédemment (effet modérateur observé sur la moyenne pupillaire), l'interruption lors du dénombrement durant la tâche n'impacte pas la relation écart-type pupillaire et performance de l'apprenant.

Tâchons de terminer l'analyse de nos résultats en nous attardant sur notre dernière variable liée à la gestuelle : la durée du dénombrement pendant la tâche.

Effet modérateur de la durée du dénombrement durant la tâche («duree\_compter»)

Les résultats présentés dans le Tableau des résultats 24 attestent de l'inexistence d'un quelconque effet de modulation de la durée sur la relation étudiée dans cette section. En effet, la variable à considérer est «Ecart-type\_pupillaire\_Duree\_compter» et présente une valeur p égale à 0,329, non significative.

Logistic regression				
Number of obs = 165				
Wald chi2(5) = 1,16				
Prob > chi2 = 0,9486				
Log pseudolikelihood = -88,246943				
Pseudo R2 = 0,0089				
Performance	Coef.	Std.Err.	z	P> z
Ecart-type_pupillaire	0,0945	0,2296	0,4100	0,3405
Pointer	-1,194	4,3060	-0,280	0,3905
Duree_compter	0,3346	0,8362	0,4000	0,3445
Ecart-type_pupillaire_pointer	0,0504	0,6821	0,0700	0,4705
Ecart-type_pupillaire_duree_compter	-0,049	0,1118	-0,440	0,3290
_cons	0,6022	1,5219	0,4000	0,3460

Niveau de significativité du test unilatéral

**Tableau des résultats 24 - effet modérateur de la durée du dénombrement sur la relation écart-type pupillaire-performance**

On assume donc que *la durée lors du décompte n'a aucun effet modérateur sur la relation entre la charge cognitive et la performance d'un apprenant sur tablette numérique*, après avoir considéré la moyenne et l'écart-type pupillaires.

En somme, *l'action de pointer, de compter* ainsi que *la durée du dénombrement* n'ont aucun effet modérateur, qu'il s'agisse de la relation entre la moyenne ou l'écart-type pupillaire et la performance. De plus, *l'interruption lors du décompte* modère l'impact de la moyenne pupillaire sur la performance. Notre hypothèse est donc partiellement supportée. L'ensemble des résultats propres à l'hypothèse 6 figurent sur la figure 15.

Ainsi, notre hypothèse

***H6 : «L'utilisation de la gestuelle diminuera l'impact de la charge cognitive sur la performance de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique» est partiellement supportée.***

Veuillez trouver la synthèse des résultats de notre étude dans la section suivante.

### 4.3.7 Synthèse des résultats

Attardons-nous tout d'abord sur les résultats obtenus pour chacune de nos hypothèses, en reprenant notre modèle sur lequel figure désormais la significativité des liens entre les concepts étudiés (figure 16).

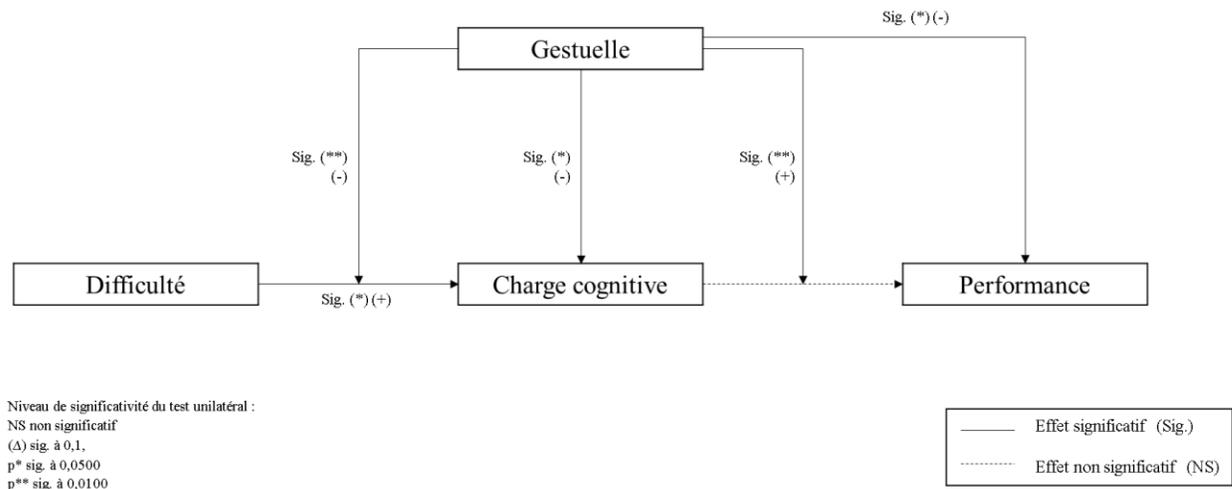


Figure 15 - Synthèse des résultats de notre étude (forme modélisée)

Notre première hypothèse (H1) postulait que la difficulté et la charge cognitive de l'enfant étaient positivement liées dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique, c.-à-d. qu'une question difficile impactait positivement la charge cognitive. Cette dernière est confirmée et notre étude donne davantage de précision au sujet de cet impact puisque l'on démontre que la difficulté impacte la *moyenne* pupillaire du sujet. Notre hypothèse est supportée.

De plus, on s'attendait à ce qu'une charge cognitive élevée nuise à la performance de l'apprenant. Notre seconde hypothèse (H2), découlant de cette affirmation, est démentie par nos résultats. Ni la moyenne ni l'écart-type du diamètre pupillaire n'impactent directement le résultat de nos participants. Cette hypothèse est donc réfutée.

Par ailleurs, les résultats issus de notre revue de littérature à propos de la gestuelle, plus précisément ceux liés à son effet réducteur de charge cognitive sont testés via l'hypothèse 3. Nos résultats corroborent *partiellement et marginalement* ce qui a été démontré par les études antérieures abordant ce sujet, en affichant un seuil de significativité parfois supérieur à 0.05. En effet, la gestuelle impacte partiellement la charge cognitive, puisqu'aucune de nos mesures relatives à la gestuelle (action de pointer, de dénombrer, de s'interrompre lorsque l'on compte ou durée du dénombrement) n'affecte la moyenne pupillaire de l'enfant. En revanche, en considérant maintenant l'écart-type du diamètre pupillaire de l'apprenant, nos données suggèrent qu'un enfant pointant du doigt, comptant sur ses doigts, qui plus est longuement, présentera un écart-type du diamètre pupillaire moindre, c.-à-d. se verra vivre un changement d'état cognitif moindre.

Quant à notre hypothèse 4 (H4), visant à tester si la gestuelle affectait directement la performance de l'enfant, seul le fait de s'interrompre lorsque l'on compte impacte négativement la performance du sujet. Sur nos quatre mesures de gestuelle présentes dans notre modèle, seule cette dernière se voit significative. Ce résultat permet d'affirmer qu'il existe un lien direct entre la gestuelle et la performance du jeune participant, mais l'on concèdera que cette hypothèse est *partiellement supportée*.

Notre avant-dernière hypothèse, l'hypothèse 5 (H5), modélise l'effet modérateur de la gestuelle sur l'impact de la difficulté de la tâche sur la charge cognitive de l'enfant. Cette hypothèse est *partiellement supportée* par nos résultats, qui mettent en évidence l'effet modérateur du geste de pointer et de compter sur ses doigts sur l'impact de la difficulté sur l'écart-type pupillaire. L'interruption lors du décompte impacte également cette relation (difficulté-écart-type), tout en affectant l'impact de la difficulté sur la moyenne pupillaire. On relèvera que la durée lors du décompte durant la tâche n'a aucun effet modérateur sur la relation difficulté – charge cognitive.

Enfin, notre sixième hypothèse 6 (H6) tendait à découvrir un potentiel effet modérateur de la gestuelle sur l'impact de la charge cognitive sur la performance de l'apprenant. Notre hypothèse est *partiellement supportée*, bien que l'effet de modulation de l'interruption lors du dénombrement sur l'impact entre la moyenne pupillaire et la performance nous permette de valider H6. En effet, le fait d'utiliser ses doigts pour pointer, pour compter, qui plus est longuement, n'affecte en rien la relation charge cognitive – performance de notre modèle.

Vous trouverez nos résultats présentés succinctement dans le tableau suivant (Tableau 14), présentant nos hypothèses, le niveau de significativité associé et dépeignant le degré de support de chacune des six hypothèses (réfutée, supportée, *partiellement* supportée et/ou *marginale*ment supportée).

Hypothèses		Valeur p	Degré de support de l'hypothèse
H1	La difficulté est positivement liée à la charge cognitive de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique	Sig. à 0,05	<b>Hypothèse <u>partiellement supportée</u></b> Impact (+) de la difficulté sur la moyenne pupillaire (sig. *)  Pas d'impact de la difficulté sur l'écart-type pupillaire
H2	La charge cognitive est négativement liée à la performance de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.	NS	<b>Hypothèse <u>réfutée</u></b>
H3	La gestuelle est négativement liée à la charge cognitive de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.	Sig. à 0,05  Et à 0,1	<b>Hypothèse <u>partiellement et marginalement supportée</u></b> Aucune variable n'impacte la moyenne pupillaire des sujets.  Impact (-) de l'action de pointer sur écart-type pupillaire (sig. *) Impact (-) de l'action de compter sur écart-type pupillaire (sig. *) Impact (-) de l'interruption sur l'écart-type ( $\Delta$ ) Impact (-) de la durée de dénombrement sur écart-type pupillaire (sig. *)
H4	La gestuelle est positivement liée à la performance de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.	Sig. à 0,05	<b>Hypothèse <u>partiellement supportée</u></b> Impact (-) de l'interruption lors du décompte sur la charge cognitive (sig. *)  Pas d'impact du geste de pointer sur la performance Pas d'impact lié à l'utilisation des doigts pour compter sur la performance Pas d'impact de la durée de dénombrement sur la performance
H5	L'utilisation de la gestuelle diminuera l'impact de la difficulté sur la charge cognitive de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.	Sig. à 0,05, à 0,01	<b>Hypothèse <u>partiellement supportée</u></b> Modération (+) de l'interruption lors du décompte sur moyenne pupillaire (sig.**) et sur écart-type pupillaire (sig. *) Modération (-) du pointage sur écart-type pupillaire (sig.**) Modération (-) du dénombrement sur écart-type pupillaire (sig.**)  Pas d'effet modérateur dû à la durée lors du dénombrement durant la tâche sur l'impact de la difficulté sur la charge cognitive.
H6	L'utilisation de la gestuelle diminuera l'impact de la charge cognitive sur la performance de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique.	Sig. à 0,01	<b>Hypothèse <u>partiellement supportée</u></b> Modération (+) de l'interruption sur la relation moyenne pupillaire et performance (sig.**)

Tableau 14 - Synthèse des résultats de notre étude

Enfin, certains résultats apparus dans notre matrice de corrélation viennent compléter les résultats issus des régressions. Ces résultats stipulent que lorsque l'enfant *compte* sur ses doigts lorsqu'il répond à la question, qui plus est lorsqu'il compte sur une longue période, l'écart-type de son diamètre pupillaire diminue.

De plus, l'enfant utilisera ses doigts pour compter plus longuement lorsque la question est difficile que dans le cas où la question est facile (cette affirmation suppose que l'enfant compte).

Enfin, plus un enfant s'interrompt lorsqu'il compte, plus sa performance diminue, et la propension à utiliser ses doigts pour pointer est élevée. De surcroît, celui-ci aura tendance à pointer plusieurs fois (corrélations positives).

## 5 Chapitre 5 : Discussion des résultats

Reprenons les résultats clés obtenus, et tentons d'expliquer les phénomènes nous conduisant à notre bilan d'étude en procédant par hypothèse, et par variable.

Notre premier résultat marquant, obtenu pour *l'hypothèse 1* est cohérent avec notre revue de littérature. En effet, notre étude démontre que la difficulté impacte directement la charge cognitive de l'apprenant (charge intrinsèque); il s'agit *plus précisément d'un effet sur la moyenne pupillaire du sujet*.

Par ailleurs, le résultat obtenu réfutant *l'hypothèse 2* peut paraître surprenant. En effet, comme énoncé dans notre revue de littérature (section 1.1.2), l'on s'attendrait à ce qu'un état de surcharge cognitive nuise à l'apprentissage de l'apprenant, et donc à la performance de l'enfant. Nous figurions, en effet, qu'une augmentation de la charge cognitive impacterait négativement la *performance*. Or notre résultat est en réalité cohérent si l'on considère un second élément : le bagage de connaissances antérieurement acquis par l'apprenant évoqué par la *théorie de l'expertise* (Ericsson et Charness, 1994) présentée en section 1.1.4.2. En effet, un apprenant qualifié d'expert obtiendra d'excellents résultats en sollicitant moindrement ses ressources cognitives, en raison de l'intégration au préalable d'un nombre conséquent de schémas et construits cognitifs. A contrario, un novice, bien que n'étant pas sûr de répondre correctement au problème, mobilisera d'importantes ressources mentales afin de répondre à une même question. Ainsi, cette affirmation est *partiellement vraie* dans la mesure où si la charge cognitive dépasse la capacité de mémoire de travail, la performance diminue (état de surcharge cognitive). En revanche, *cette relation n'est pas linéaire et dépend d'autres facteurs*, tels que l'expérience et le bagage de connaissances antérieures dont dispose l'apprenant.

Autre résultat révélé par *l'hypothèse 3*, notre étude démontre que l'action de compter sur ses doigts, de même que l'action de pointer du doigt l'interface ou l'objet étudié n'ont aucun effet direct sur la moyenne pupillaire de l'enfant lorsque l'on contrôle la difficulté de la question (cf. résultats pour H3 présentés dans la figure 9). L'on pourrait expliquer l'un de ces résultats en rappelant que le geste de pointer est relativement *intuitif dès le plus jeune âge* (Liszkowski *et al.*, 2012), et agit donc comme une *forme de connaissance biologique primaire* (ne requérant, de ce fait, qu'un faible investissement en charge cognitive, cf. section 1.1.1.). L'utilisation de ce geste ne modifierait en rien la charge cognitive associée à l'exercice; ceci viendrait expliquer notre résultat. De plus, nos statistiques descriptives (Tableaux 10 et 11 section 4.1.) indiquent que les enfants utilisèrent leurs

doigts pour compter dans uniquement 23,98% des cas. Il s'agirait donc de tester de nouveau notre hypothèse en augmentant la taille de l'échantillon ou en formulant une consigne de l'exercice exigeant l'utilisation de ses doigts pour compter lors de la résolution du problème, afin de pouvoir confirmer ou infirmer notre résultat ayant trait à l'action de compter.

La variable «*interruption*» se révèle être la variable la plus robuste du modèle si l'on se fie à son effet sur la performance de l'enfant. En effet, celle-ci est la seule variable affectant négativement la performance de l'apprenant, cf. **hypothèse 4**. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus dans l'étude conduite par Bailey, Konstan et Carlis (2000). Cette dernière vise à mesurer l'effet de l'interruption d'une activité sur la performance d'un sujet œuvrant sur une interface numérique, et ce, dans différents contextes : calcul d'additions, contexte de dénombrement, de lecture, etc. Les résultats obtenus par les auteurs démontrent que le temps d'exécution (mesure de la performance du sujet pour cette étude) pour les différents types de tâches, notamment celle liée au dénombrement, est plus élevé en cas d'interruption que lors d'une exécution sans interruption : la performance serait moindre dans le cas où le sujet comptait en s'interrompant. De plus, la seconde hypothèse de l'étude tend à démontrer qu'une *tâche induisant de plus grandes ressources cognitives (c'est le cas pour une action de dénombrement) serait, comparativement à une tâche requérant peu de ressources cognitives, sujette à un impact perturbateur («disruptive effect») plus important lorsque celle-ci est interrompue*. Ainsi, nos résultats obtenus pour H4 corroborent les résultats de l'étude conduite par Bailey, Konstan et Carlis (2000).

De plus, nos résultats suggèrent que l'*interruption* lors du décompte n'impacte d'aucune manière la charge cognitive de l'enfant (H3), et modère à la hausse l'impact du niveau de difficulté de la question sur la charge cognitive de l'enfant, dans le cas où la question est difficile. Un enfant devrait donc veiller à ne pas s'interrompre de manière prolongée en cas de problème complexe.

Notre étude teste également l'effet de la *durée du dénombrement*. Il s'avère que cette variable présente un effet uniquement significatif sur l'écart-type pupillaire de l'enfant. Celle-ci n'affecte pas la performance d'un apprenant, et ne présente aucun effet modérateur (H5 et H6) sur notre modèle. Ceci corrobore la théorie de l'expertise énoncée ci-haut, puisqu'un enfant comptant longuement selon qu'il est expert ou novice ne verra pas sa probabilité de succès augmenter.

Finalement, notre étude avait pour objectif de tester l'existence d'effets modérateurs de la gestuelle sur un construit présentant les variables : difficulté (contrôlée), charge cognitive et performance de l'enfant. Nos résultats démontrent qu'il existe un ***réel effet modérateur à la baisse de la gestuelle sur la relation difficulté – charge cognitive (H5)***. Autrement dit, dans le cas où l'enfant utilise ses

doigts pour compter, qui plus est dans un contexte de résolution d'une question complexe, la difficulté perçue n'impactera pas autant la charge cognitive mobilisée durant le traitement de la tâche. Ainsi, *nous démontrons que la gestuelle n'impacte pas directement la charge cognitive, mais diminue la mobilisation cognitive induite par la difficulté d'une question.*

En revanche, force est de constater que notre **sixième hypothèse** n'est que partiellement supportée. En effet, parmi nos variables associées à la gestuelle, seule l'interruption lors du décompte impacte à la hausse la relation entre écart-type pupillaire et performance. Ainsi, l'écart-type du diamètre pupillaire n'impacte pas directement la performance de l'apprenant (H2), mais cette relation est renforcée et revue à la hausse dans le cas où l'enfant s'interrompt de manière prolongée.

## 6 Chapitre 6 : Conclusion

### 6.1 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 Fred Paas, Renkl et Sweller (2003) postulant que la difficulté impactait à la hausse la charge cognitive. C'est également ce que nous démontrons dans le cadre de ce mémoire. De plus, Liszkowski *et al.* (2012) avancent que les gestes déictiques, intuitifs, ne requièrent qu'une faible demande cognitive pour l'apprenant. Nos résultats densifient ce résultat. Par ailleurs, Bailey, Konstan et Carlis (2000) démontrent que l'interruption lors d'une activité, y compris celle de compter, nuit à la performance du sujet : c'est également ce que nous avançons dans ce mémoire.

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. Notre mesure physiologique de la charge cognitive nous permet de non seulement souligner l'existence de quelconques variations de la charge cognitive (résultat que l'on pourrait obtenir via l'usage de mesures subjectives), mais de pouvoir quantifier sa significativité, et de pouvoir préciser s'il s'agit d'effets sur la moyenne ou l'écart-type de cette charge. L'étude menée par Hu, Ginns et Bobis (2015) pourraient être reconduites en arborant une méthodologie permettant de spécifier de manière quantifiée les effets des variables considérées sur la charge cognitive.

Par ailleurs, l'utilisation de mesures liées à la gestuelle telles que la fréquence d'utilisation du geste (*nombre de pointages*), le temps d'exécution du geste (*durée du dénombrement*), ou l'interruption de l'activité (lors du décompte) viennent densifier la littérature ayant trait à la dimension comportementale de l'enfant lorsque celui-ci résout un exercice mathématique. À titre d'exemple, l'étude conduite par Goldin-Meadow, Cook et Mitchell (2009) met en évidence le lien entre la gestuelle et la performance de l'enfant dans un contexte d'apprentissage des mathématiques sans être allée aussi loin empiriquement concernant les mesures et gestes responsables de son impact positif. De surcroît, notre étude teste le phénomène dans un contexte d'apprentissage numérique.

Enfin, nos résultats testent non seulement les effets directs de la gestuelle sur la performance et la charge cognitive, mais présentent également ses *effets modérateurs* sur le niveau de difficulté d'une

tâche et sur l'impact de la charge cognitive sur la performance d'un enfant. Ces effets modérateurs sur notre construit difficulté-charge cognitive-performance n'a, à ce jour, jamais été abordé dans la littérature. Cette étude démontre donc que la gestuelle a davantage d'effets modérateurs, qui plus est sur la perception de la difficulté par l'enfant, que d'effets directs sur la gestuelle ou la performance. Ceci constitue notre principal apport théorique.

## 6.2 Implications managériales

D'un point de vue managérial, les gestionnaires de produits et concepteurs d'applications pédagogiques pour enfants ont tout intérêt à se préoccuper de la gestuelle.

### *Optimisation des tutoriels*

Il est de leur responsabilité de veiller à limiter la charge cognitive requise durant l'utilisation de leur produit. Ces professionnels sont à même de limiter la charge cognitive extrinsèque induite par le design du produit en offrant aux utilisateurs une interface ergonomique, facile d'utilisation (Clark et Mayer, 2016). Ceux-ci devraient, par ailleurs, optimiser la qualité des tutoriels accompagnant la résolution de problèmes mathématiques de l'enfant sur tablette. En effet, les tutoriels (encadré 3 Annexe 2), ou toutes autres aides disponibles pour l'apprenant (lecture sonore de la question (encadré 4 Annexe 2), utilisation de codes de couleurs, vidéos ...) sont vecteurs de diminution de la charge cognitive du jeune utilisateur. De plus, le format de ces tutoriels devrait être revu, c'est ce qu'indique l'étude de Shipman *et al.* (2005 : 55) : «Students commented that the presentation of information was too text-based making tutorial progress boring or arduous at times». Les auteurs démontrent que les tutoriels sont généralement jugés comme étant trop longs et répétitifs par les étudiants.

Ainsi, il serait pertinent d'introduire une dimension comportementale (la gestuelle) au cœur des raisonnements, en offrant un accès à *des vidéos expliquant l'énoncé ou présentant la solution aux exercices en usant de gestes*, afin que les apprenants puissent modéliser les concepts autrement que de manière visuelle (textuelle) ou auditive.

Ceci permettrait, d'ailleurs, d'optimiser la qualité du produit en favorisant l'apprentissage d'enfants «kinesthésiques», non considérés lorsque l'on présente des supports d'apprentissage impliquant uniquement les dimensions visuelles et auditives. En effet, il existe trois types d'apprentissage, selon les modalités d'encodage sensoriel : visuel, auditif et kinesthésique (Felder et Silverman, 1988). Les apprenants caractérisés par le dernier type d'apprentissage représentent 5% de la population, et apprennent facilement lorsqu'ils peuvent «participer, toucher, agir ... et être

physiquement actifs» (Teasdale, 2004). Ainsi, le fait de présenter des explications sollicitant des ressources sensorimotrices (ex. compter sur ses doigts) permettrait aux enfants présentant cette caractéristique de bénéficier d'explications communiquées via un médium leur correspondant. Une application «multimédia» impliquant l'utilisation de la vue (images) et/ou son (ouïe) exclut ce dernier segment de population en développement cognitif. L'intégration de la gestuelle dans les tutoriels favoriserait l'expérience d'apprentissage, et pourrait, a fortiori, impacter la performance d'un plus large panel d'utilisateurs (enfants) de l'interface numérique.

De plus, l'utilisation de gestes pour expliquer un concept ou un exercice est dissociée du langage maîtrisé par l'enfant. Autrement dit, un enfant dont la langue maternelle serait différente de celle d'enseignement comprendrait davantage la résolution présentée de manière mimée via la vidéo, si on la compare à une communication écrite de la solution. Enfin, on soulignera que ces vidéos devront être facilement «trouvables» au sein des interfaces («findability and usability of the videos») (Shipman *et al.*, 2005).

Nous recommandons donc de développer une application divulguant du contenu à l'enfant incluant les mouvements, afin de 1) réduire l'impact de la difficulté d'un problème sur la charge cognitive de l'apprenant, 2) de solliciter davantage d'enfants (inclusion des enfants kinesthésiques lors du développement des capsules d'aide à la résolution) et 3) de transcender les biais dus au langage (langue maternelle vs. langue d'enseignement).

### «Motion-Learning»

Enfin, comme énoncé dans la section 1.2.1, une dissonance entre la gestuelle d'un enfant et son explication (à voix haute) révèle un état transitionnel d'apprentissage. L'enfant est alors plus réceptif aux explications. Les parents ou pédagogues devraient être alertés ou informés de l'événement afin de pouvoir accompagner l'enfant lorsque celui-ci est le plus enclin à utiliser de manière efficace l'information reçue.

Comment pourrait-on mettre en place un tel système de suivi du comportement de l'enfant dans un contexte d'apprentissage numérique? Dans le jargon propre aux IHM (interactions humain-machine), les concepts de «natural user interfaces», «motion gaming» ou «spatial tracking» sont au cœur des préoccupations des scientifiques. Initié par l'industrie du jeu vidéo, il est désormais possible de suivre les mouvements des utilisateurs sans que ceux-ci touchent l'interface numérique : ex. Kinect pour la Xbox, PlayStation Move ou Wii Remote.

Plus récemment, et plus adapté à notre contexte d'étude, le «leap motion» constitue la nouvelle génération de capteurs de mouvements 3D (Annexe 9). Ce logiciel permet de reconnaître la forme de la main et de distinguer le mouvement de chacun des dix doigts via l'utilisation d'un boîtier de taille réduite, peu intrusif, et branché à la tablette. Les concepteurs et professionnels des technologies de l'information pourraient alors développer un produit se servant de cette technologie afin de trianguler données comportementales, sonores (explications à voix haute) et résolution d'exercice afin de constituer un nouveau courant de recherches futures: celui du «**Motion Learning**».

### 6.3 Limites de la recherche et avenues de recherches futures

Comme toute étude, 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 de manque de masse critique pour certaines de nos variables. C'est notamment le cas pour le nombre de pointages (nos sujets ayant en moyenne pointé du doigt dans seulement 4% des cas) et qui, par ailleurs, ne suit pas exactement une loi normale (variable non normalisée). Il serait donc intéressant, voire nécessaire, que nos variables associées à la *gestuelle soient manipulées* dans le cadre de recherches futures.

Ceci permettrait, par ailleurs, de densifier nos résultats. En effet, la variable associée à l'interruption durant le décompte («*interruption\_compter*») est certes significative, or force est de constater que les enfants ne s'interrompent en comptant que dans 2% des cas. Ce résultat doit donc être considéré, tout en concédant son manque de robustesse dû à la rareté de l'événement. Une étude ultérieurement conduite sur davantage d'individus nous indiquerait si ce phénomène est véritablement rare, ou si nos résultats étaient dus à un manque de masse critique.

De plus, même si notre codification de la gestuelle se base sur des études antérieures traitant de gestes spécifiques (Hu, Ginns et Bobis, 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 (ex. : interruption, fin du décompte) peut être ambiguë. Ce propos est appuyé par Reynolds et Reeve (2001), qui, dans leur étude «*Gesture in collaborative mathematics problem-solving*» relataient déjà que: «*Fine-grained description and classification of gestures may allow a better insight into the interweaving of speech and gesture that may further elucidate the nature of collaborative cognitive change*» (Reynolds et Reeve, 2001 : 450).

D'un point de vue statistique, nous avons choisi un seuil expérimental de 0,1. Ainsi, l'un de nos résultats, l'impact de l'interruption sur l'écart-type pupillaire (H3), bien que proche de 0,064, aurait différé, devenant de ce fait non significatif. De surcroît, l'on pourrait nous voir reprocher nos R carrés relativement bas (proches de zéro) pour la plupart de nos modèles (tableaux des résultats 1, 2, 3, etc.), n'expliquant que faiblement le phénomène. Or notre objectif de recherche n'a ni pour but d'être prédictif, ni pour prétention d'affirmer que la gestuelle explique en majeure partie les variations de performance ou de charge cognitive de l'enfant dans un contexte d'apprentissage sur tablette numérique. En effet, nous sommes conscients que le diamètre pupillaire, associé à la charge cognitive du participant dans cette étude, est sous l'influence de divers facteurs tels que 1) le degré de luminosité de l'environnement dans lequel l'expérience est conduite (ex. valeurs moyennes rapportées pour le diamètre pupillaire en condition de faible éclairage se situent entre de 4.7 et 5 mm), 2) de l'accommodation binoculaire (changement de courbure du cristallin permettant de passer d'une vision lointaine à une vision proche (Gatinel, 2015)), ou 3) de l'âge du sujet (section 3.5.1). Cependant, nous noterons que le degré de luminosité de l'environnement a été contrôlé via l'utilisation de la même interface et via l'utilisation d'une même salle de collecte, affichant les mêmes caractéristiques lumineuses pour l'ensemble des participants.

Enfin, certains concepts pourraient aisément intégrer notre modèle, et constitueraient d'intéressantes pistes de recherches futures. À titre d'exemple, l'on pourrait s'attarder sur le «*feedback*» reçu instantanément après chaque réponse, et 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'un feedback positif vs. négatif sur le *contrôle de soi* («*self-control*»). Ce feedback négatif impacte également l'ego du répondant. Le phénomène d'«*Ego Depletion*» est notamment abordé par Baumeister *et al.* (1998); Inzlicht et Schmeichel (2012); Schmeichel, Caskey et Hicks (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 intégreraient parfaitement notre modèle.

D'un point de vue plus technique et managérial, tel que nous l'énoncions précédemment (section 6.3), des recherches futures touchant au «*leap motion*» devront être menées, plus précisément dans un contexte d'apprentissage numérique. Les études conduites jusqu'alors à ce sujet abordent la facilité d'usage («*usability*») (Scicali et Bischof, 2015) ou la validité (Smeragliuolo *et al.*, 2016) du «*leap motion*». On retrouve également un pan de littérature relatant son utilisation dans l'industrie du jeu vidéo (Yanaka et Ishiguro, 2015) ou l'industrie médicale : test du «*leap motion*» pour développer les capacités sensorimotrices d'enfant atteints d'autisme (Zhu *et al.*, 2015), pour

favoriser la réhabilitation d'une main blessée (Taylor et Curran, 2015), et dans un contexte de chirurgie robotique endonasale (Travaglini *et al.*, 2016)).

Les études conduites liant «Leap motion» et apprentissage se font encore rares, et ont trait au langage des signes (Mohandes, Aliyu et Deriche, 2015; Quesada, López et Guerrero, 2015; Soares *et al.*, 2015). Il serait alors intéressant que des recherches futures intègrent ce nouveau concept et viennent tester notre modèle, en usant d'un nouvel outil de capture et de codification des mouvements.

## 6.4 Conclusion générale

En somme, cette étude met en exergue l'impact de la gestuelle, principalement le mouvement des mains, quant à son effet sur la charge cognitive d'un apprenant dans un contexte d'apprentissage numérique des mathématiques.

Notre étude démontre tout d'abord que la difficulté croissante d'une question impacte à la hausse la charge cognitive induite par la résolution de cette question. Or il s'avère que la gestuelle a un véritable effet modérateur à la baisse de l'impact de la complexité d'une question sur la charge cognitive de l'apprenant. L'utilisation de la gestuelle fait varier la charge mentale de l'apprenant, sans pour autant l'impacter à la hausse.

Son utilité d'un point de vue managérial est largement démontrée. Son inclusion dans les tutoriels vidéo permettrait de considérer un nouveau segment d'apprenants (les enfants kinesthésiques) tout en permettant de transcender toutes barrières liées à la langue (contexte d'apprentissage où la langue d'enseignement diffère de la langue maternelle). Des instruments de détection des mouvements évolués pourraient permettre de trianguler l'ensemble des informations communiquées par l'enfant, sous forme verbale et physique (usage de gestes), et d'assister l'enfant en difficulté de manière optimale.

De futures recherches pourront être conduites afin de généraliser ou consolider nos résultats, pour finalement faire prendre conscience aux professionnels de l'enseignement et des technologies de l'importance d'utiliser de tutoriels intégrant une dimension sensorimotrice. Cette dernière devrait être au cœur des outils d'apprentissage, qui plus est numériques.

## 7 Bibliographie

- ALIBALI, MARTHA WAGNER et Susan Goldin-Meadow (1993). « Gesture-speech mismatch and mechanisms of », *Cognitive psychology*, vol. 25, p. 468-523.
- Alibali, Martha W, Mitchell J Nathan, Matthew S Wolfgram, R Breckinridge Church, Steven A Jacobs, Chelsea Johnson Martinez, et al. (2014). « How teachers link ideas in mathematics instruction using speech and gesture: A corpus analysis », *Cognition and Instruction*, vol. 32, no 1, p. 65-100.
- Alibali, Martha Wagner et Alyssa A DiRusso (1999). « The function of gesture in learning to count: More than keeping track », *Cognitive development*, vol. 14, no 1, p. 37-56.
- Atkinson, Robert K, Sharon J Derry, Alexander Renkl et Donald Wortham (2000). « Learning from examples: Instructional principles from the worked examples research », *Review of educational research*, vol. 70, no 2, p. 181-214.
- Baccino, Thierry (2002). « Oculométrie cognitive », *Dictionnaire des Sciences cognitives*, p. 202-203.
- Baccino, Thierry et Teresa Colombi (2001). « L'analyse des mouvements des yeux sur le web », *Les interactions homme-système: perspectives et recherches psycho ergonomiques*. Paris: Hermès.
- Bartholomew, John B et Esbelle M Jowers (2011). « Physically active academic lessons in elementary children », *Preventive medicine*, vol. 52, p. S51-S54.
- Baumeister, Roy F., Ellen Bratslavsky, Mark Muraven et Dianne M. Tice (1998). « Ego depletion: Is the active self a limited resource? », *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 74, no 5, p. 1252-1265.
- Beer, Randall D (1995). « A dynamical systems perspective on agent-environment interaction », *Artificial intelligence*, vol. 72, no 1, p. 173-215.
- Brissiaud, Rémi (2011). *Comment les enfants apprennent à calculer*, Retz.
- Broaders, Sara C, Susan Wagner Cook, Zachary Mitchell et Susan Goldin-Meadow (2007). « Making children gesture brings out implicit knowledge and leads to learning », *Journal of Experimental Psychology: General*, vol. 136, no 4, p. 539.
- Brunken, Roland, Jan L Plass et Detlev Leutner (2003). « Direct measurement of cognitive load in multimedia learning », *Educational Psychologist*, vol. 38, no 1, p. 53-61.
- Burke, Jeff, Jonathan Friedman, Eitan Mendelowitz, Heemin Park et Mani B Srivastava (2006). « Embedding expression: Pervasive computing architecture for art and entertainment », *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 2, no 1, p. 1-36.
- Butterworth, Brian (1999). *The mathematical brain*, Macmillan.
- Chandler, Paul et André Tricot (2015). « Mind your body: The essential role of body movements in children's learning », *Educational Psychology Review*, vol. 27, no 3, p. 365-370.
- Cheng, Tsung-Sheng, Yu-Chun Lu et Chu-Sing Yang (2015). « Using the multi-display teaching system to lower cognitive load », *Journal of Educational Technology & Society*, vol. 18, no 4, p. 128-140.
- Church, Ruth Breckinridge, Saba Ayman-Nolley et Shahrzad Mahootian (2004). « The role of gesture in bilingual education: Does gesture enhance learning? », *International Journal of Bilingual Education and Bilingualism*, vol. 7, no 4, p. 303-319.
- Clark, Ruth C et Richard E Mayer (2016). *E-learning and the science of instruction: Proven guidelines for consumers and designers of multimedia learning*, John Wiley & Sons.
- College, Reed (2015). *The vce option: Changing standard error reports for quirky data*. <http://www.reed.edu/psychology/stata/gs/tutorials/vce.html>

- Congdon, EL, MA Novack, N Brooks, N Hemani-Lopez, L O'Keefe et S Goldin-Meadow (2015). « Better together: Simultaneous presentation of speech and gesture in math instruction supports generalization and retention », *Manuscript submitted for publication*.
- Cook, Susan Wagner, Ryan G Duffy et Kimberly M Fenn (2013). « Consolidation and transfer of learning after observing hand gesture », *Child development*, vol. 84, no 6, p. 1863-1871.
- Cooper, Graham et John Sweller (1987). « Effects of schema acquisition and rule automation on mathematical problem-solving transfer », *Journal of educational psychology*, vol. 79, no 4, p. 347.
- Cooper, Graham, Sharon Tindall-Ford, Paul Chandler et John Sweller (2001). « Learning by imagining », *Journal of Experimental Psychology: Applied*, vol. 7, no 1, p. 68.
- Cosman, Joshua D et Shaun P Vecera (2010). « Attention affects visual perceptual processing near the hand », *Psychological Science*.
- Cox, Margaret J (2013). « Formal to informal learning with it: Research challenges and issues for e-learning », *Journal of computer assisted learning*, vol. 29, no 1, p. 85-105.
- Cuendet, Sébastien, Jessica Dehler-Zufferey, Giulia Ortoleva et Pierre Dillenbourg (2015). « An integrated way of using a tangible user interface in a classroom », *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, vol. 10, no 2, p. 183-208.
- Donnelly, Joseph E et Kate Lambourne (2011). « Classroom-based physical activity, cognition, and academic achievement », *Preventive medicine*, vol. 52, p. S36-S42.
- Duchowski, Andrew (2007). *Eye tracking methodology: Theory and practice*, vol. 373, Springer Science & Business Media.
- Durkin, Kevin, James Boyle, Simon Hunter et Gina Conti-Ramsden (2015). « Video games for children and adolescents with special educational needs », *Zeitschrift für Psychologie*.
- Erickson, Kirk I, Charles H Hillman et Arthur F Kramer (2015). « Physical activity, brain, and cognition », *Current Opinion in Behavioral Sciences*, vol. 4, p. 27-32.
- Ericsson, K Anders et Neil Charness (1994). « Expert performance: Its structure and acquisition », *American psychologist*, vol. 49, no 8, p. 725.
- Fayol, Michel, Pierre Barrouillet et Catherine Marinthe (1998). « Predicting arithmetical achievement from neuro-psychological performance: A longitudinal study », *Cognition*, vol. 68, no 2, p. B63-B70.
- Fayol, Michel, Pierre Largy et Patrick Lemaire (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*, vol. 47, no 2, p. 437-464.
- Fedewa, Alicia L et Soyeon Ahn (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*, vol. 82, no 3, p. 521-535.
- Felder, Richard M et Linda K Silverman (1988). « Learning and teaching styles in engineering education », *Engineering education*, vol. 78, no 7, p. 674-681.
- Fischer, Martin H et Noemi Hoellen (2004). « Space-and object-based attention depend on motor intention », *The Journal of general psychology*, vol. 131, no 4, p. 365.
- Gatinel, Damien (2015). *La pupille irienne*. <http://www.gatinel.com/recherche-formation/pupille-irienne/>
- Geary, David C (2008). « An evolutionarily informed education science », *Educational Psychologist*, vol. 43, no 4, p. 179-195.
- Geary, David C. (1995). « Reflections of evolution and culture in children's cognition: Implications for mathematical development and instruction », *American Psychologist*, vol. 50, no 1, p. 24-37.

- Geary, DC (2005). « Les troubles d'apprentissage en arithmétique: Rôle de la mémoire de travail et des connaissances conceptuelles », *La dyscalculie*. Marseille: Solal.
- Glenberg, Arthur M, Andrew B Goldberg et Xiaojin Zhu (2011). « Improving early reading comprehension using embodied cai », *Instructional Science*, vol. 39, no 1, p. 27-39.
- Glenberg, Arthur M, Tiana Gutierrez, Joel R Levin, Sandra Japuntich et Michael P Kaschak (2004). « Activity and imagined activity can enhance young children's reading comprehension », *Journal of Educational Psychology*, vol. 96, no 3, p. 424.
- Glenberg, Arthur M et David A Robertson (1999). « Indexical understanding of instructions », *Discourse Processes*, vol. 28, no 1, p. 1-26.
- Glenberg, Arthur M, Marc Sato, Luigi Cattaneo, Lucia Riggio, Daniele Palumbo et Giovanni Buccino (2008). « Processing abstract language modulates motor system activity », *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, vol. 61, no 6, p. 905-919.
- Goldin-Meadow, Susan (2005). *Hearing gesture: How our hands help us think*, Harvard University Press.
- Goldin-Meadow, Susan, Susan Wagner Cook et Zachary A Mitchell (2009). « Gesturing gives children new ideas about math », *Psychological Science*, vol. 20, no 3, p. 267-272.
- Goldin-Meadow, Susan, Howard C Nusbaum, Philip Garber et R Breckinridge Church (1993). « Transitions in learning: Evidence for simultaneously activated strategies », *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol. 19, no 1, p. 92.
- Goldin-Meadow, Susan, Howard Nusbaum, Spencer D Kelly et Susan Wagner (2001). « Explaining math: Gesturing lightens the load », *Psychological Science*, vol. 12, no 6, p. 516-522.
- Gracia-Bafalluy, Maria et Marie-Pascale Noël (2008). « Does finger training increase young children's numerical performance? », *Cortex*, vol. 44, no 4, p. 368-375.
- Hartson, Rex et Pardha S Pyla (2012). *The ux book: Process and guidelines for ensuring a quality user experience*, Elsevier.
- Holmqvist, Kenneth, Marcus Nyström, Richard Andersson, Richard Dewhurst, Halszka Jarodzka et Joost Van de Weijer (2011). *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*, OUP Oxford.
- Hu, Fang-Tzu, Paul Ginns et Janette Bobis (2015). « Getting the point: Tracing worked examples enhances learning », *Learning and Instruction*, vol. 35, p. 85-93.
- Huang, Yueh-Min, Tsung-Ho Liang, Yen-Ning Su et Nian-Shing Chen (2012). « Empowering personalized learning with an interactive e-book learning system for elementary school students », *Educational Technology Research and Development*, vol. 60, no 4, p. 703-722.
- Inzlicht, Michael et Brandon J Schmeichel (2012). « What is ego depletion? Toward a mechanistic revision of the resource model of self-control », *Perspectives on Psychological Science*, vol. 7, no 5, p. 450-463.
- Jacko, Julie A (2012). *Human computer interaction handbook: Fundamentals, evolving technologies, and emerging applications*, CRC press.
- Jolibert, Alain et Philippe Jourdan (2006). « Marketing research: Méthodes de recherche et d'études en marketing ».
- Kahneman, Daniel et Jackson Beatty (1966). « Pupil diameter and load on memory », *Science*, vol. 154, no 3756, p. 1583-1585.
- Kalyuga, Slava, Paul Ayres, Paul Chandler et John Sweller (2003). « The expertise reversal effect », *Educational Psychologist*, vol. 38, no 1, p. 23-31.

- Kalyuga, Slava, Paul Chandler et John Sweller (1998). « Levels of expertise and instructional design », *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 40, no 1, p. 1-17.
- Kalyuga, Slava, Paul Chandler, Juhani Tuovinen et John Sweller (2001). « When problem solving is superior to studying worked examples », *Journal of educational psychology*, vol. 93, no 3, p. 579.
- Kastens, Kim A, Lynn S Liben et Shruti Agrawal (2008). « Epistemic actions in science education », dans *Spatial cognition vi. Learning, reasoning, and talking about space*, Springer, p. 202-215.
- Kharitonova, Maria, Warren Winter et Margaret A Sheridan (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*.
- Kirsh, David et Paul Maglio (1994). « On distinguishing epistemic from pragmatic action », *Cognitive science*, vol. 18, no 4, p. 513-549.
- Klingner, Jeff, Barbara Tversky et Pat Hanrahan (2011). « Effects of visual and verbal presentation on cognitive load in vigilance, memory, and arithmetic tasks », *Psychophysiology*, vol. 48, no 3, p. 323-332.
- Ladyada (2017). *Leap motion controller*. <https://www.adafruit.com/products/2106>
- Lang, Joan (2007). *The effect of presenting worked examples for problem solving in a computer game* [Ph.D.], 3278432, Ann Arbor, University of Southern California, 253 p.
- Leahy, Wayne et John Sweller (2004). « Cognitive load and the imagination effect », *Applied cognitive psychology*, vol. 18, no 7, p. 857-875.
- Lieberman, Matthew D, Elliot T Berkman et Tor D Wager (2009). « Correlations in social neuroscience aren't voodoo: Commentary on vul et al.(2009) », *Perspectives on Psychological Science*, vol. 4, no 3, p. 299-307.
- Lindemann, Oliver, Prisca Stenneken, Hein T Van Schie et Harold Bekkering (2006). « Semantic activation in action planning », *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol. 32, no 3, p. 633.
- Liszkowski, Ulf, Penny Brown, Tara Callaghan, Akira Takada et Conny de Vos (2012). « A prelinguistic gestural universal of human communication », *Cognitive Science*, vol. 36, no 4, p. 698-713.
- Luarn, Pin et Hsin-Hui Lin (2005). « Toward an understanding of the behavioral intention to use mobile banking », *Computers in human behavior*, vol. 21, no 6, p. 873-891.
- Lunenburg, Fred C et Beverly J Irby (2008). *Writing a successful thesis or dissertation: Tips and strategies for students in the social and behavioral sciences*, Corwin Press.
- Mavilidi, Myrto-Foteini, Anthony D Okely, Paul Chandler, Dylan P Cliff et Fred Paas (2015). « Effects of integrated physical exercises and gestures on preschool children's foreign language vocabulary learning », *Educational Psychology Review*, vol. 27, no 3, p. 413-426.
- Mayer, Richard E (2009). *Multimedia learning*, Cambridge university press.
- Mayer, Richard E et Joan K Gallini (1990). « When is an illustration worth ten thousand words? », *Journal of educational psychology*, vol. 82, no 4, p. 715.
- Mayer, Richard E et Roxana Moreno (2002). « Aids to computer-based multimedia learning », *Learning and instruction*, vol. 12, no 1, p. 107-119.
- McNeill, David (1992). *Hand and mind: What gestures reveal about thought*, University of Chicago Press.
- McNeill, David (2000). *Language and gesture*, vol. 2, Cambridge University Press.

- Mirhoseini, Seyed Mohammad Mahdi, Pierre-Majorique Léger et Sylvain Sénécal (2017). « The influence of task characteristics on multiple objective and subjective cognitive load measures », dans *Information systems and neuroscience*, Springer, p. 149-156.
- Noël, Marie-Pascale (2005). « Finger gnosis: A predictor of numerical abilities in children? », *Child Neuropsychology*, vol. 11, no 5, p. 413-430.
- Novack, Miriam et Susan Goldin-Meadow (2015). « Learning from gesture: How our hands change our minds », *Educational Psychology Review*, vol. 27, no 3, p. 405-412.
- O'Hare, Elizabeth D, Lisa H Lu, Suzanne M Houston, Susan Y Bookheimer et Elizabeth R Sowell (2008). « Neurodevelopmental changes in verbal working memory load-dependency: An fmri investigation », *Neuroimage*, vol. 42, no 4, p. 1678-1685.
- Paas, Fred GWC, Jeroen JG Van Merriënboer et Jos J Adam (1994). « Measurement of cognitive load in instructional research », *Perceptual and motor skills*, vol. 79, no 1, p. 419-430.
- Paas, Fred, Alexander Renkl et John Sweller (2003). « Cognitive load theory and instructional design: Recent developments », *Educational psychologist*, vol. 38, no 1, p. 1-4.
- Paas, Fred et John Sweller (2012). « An evolutionary upgrade of cognitive load theory: Using the human motor system and collaboration to support the learning of complex cognitive tasks », *Educational Psychology Review*, vol. 24, no 1, p. 27-45.
- Paas, Fred et Tamara Van Gog (2006). « Optimising worked example instruction: Different ways to increase germane cognitive load », *Learning and Instruction*, vol. 16, no 2, p. 87-91.
- Park, Hun Myoung (2008). « Univariate analysis and normality test using sas, stata, and spss », *The University Information Technology Services (UITS) Center for Statistical and Mathematical Computing, Indiana University*.
- Piaget, Jean (1970). « Science of education and the psychology of the child. Trans. D. Coltman ».
- Ping, Raedy et Susan Goldin-Meadow (2010). « Gesturing saves cognitive resources when talking about nonpresent objects », *Cognitive Science*, vol. 34, no 4, p. 602-619.
- Ping, Raedy M et Susan Goldin-Meadow (2008). « Hands in the air: Using ungrounded iconic gestures to teach children conservation of quantity », *Developmental psychology*, vol. 44, no 5, p. 1277.
- Pollock, Edwina, Paul Chandler et John Sweller (2002). « Assimilating complex information », *Learning and instruction*, vol. 12, no 1, p. 61-86.
- Price, Sara et Taciana Pontual Falcão (2011). « Where the attention is: Discovery learning in novel tangible environments », *Interacting with Computers*, vol. 23, no 5, p. 499-512.
- Price, Sara, Carey Jewitt et Lucrezia Crescenzi (2015). « The role of ipads in pre-school children's mark making development », *Computers & Education*, vol. 87, p. 131-141.
- Quesada, Luis, Gustavo López et Luis A Guerrero (2015). « Sign language recognition using leap motion », dans *Ubiquitous computing and ambient intelligence. Sensing, processing, and using environmental information*, Springer, p. 277-288.
- Quilici, Jill L et Richard E Mayer (1996). « Role of examples in how students learn to categorize statistics word problems », *Journal of Educational Psychology*, vol. 88, no 1, p. 144.
- Read, JC et P Markopoulos (2013). « Child-computer interaction », *International Journal of Child-Computer Interaction*, vol. 1, no 1, p. 2-6.
- Reed, Catherine L, Jefferson D Grubb et Cleophus Steele (2006). « Hands up: Attentional prioritization of space near the hand », *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol. 32, no 1, p. 166.
- Renkl, Alexander et Robert K Atkinson (2003). « Structuring the transition from example study to problem solving in cognitive skill acquisition: A cognitive load perspective », *Educational psychologist*, vol. 38, no 1, p. 15-22.

- Renkl, Alexander, Robert K Atkinson, Uwe H Maier et Richard Staley (2002). « From example study to problem solving: Smooth transitions help learning », *The Journal of Experimental Education*, vol. 70, no 4, p. 293-315.
- Renkl, Alexander, Robin Stark, Hans Gruber et Heinz Mandl (1998). « Learning from worked-out examples: The effects of example variability and elicited self-explanations », *Contemporary educational psychology*, vol. 23, no 1, p. 90-108.
- Reynolds, Fiona J. et Robert A. Reeve (2001). « Gesture in collaborative mathematics problem-solving », *The Journal of Mathematical Behavior*, vol. 20, no 4, p. 447-460.
- Roth, Wolff-Michael (2000). « From gesture to scientific language », *Journal of pragmatics*, vol. 32, no 11, p. 1683-1714.
- Rusconi, Elena, Vincent Walsh et Brian Butterworth (2005). « Dexterity with numbers: Rtms over left angular gyrus disrupts finger gnosis and number processing », *Neuropsychologia*, vol. 43, no 11, p. 1609-1624.
- Sato, Marc et Muriel Lalain (2008). « On the relationship between handedness and hand-digit mapping in finger counting », *Cortex*, vol. 44, no 4, p. 393-399.
- Schall, Andrew (2008). « Designing a successful eye tracking usability study step-by-step », communication présentée au *International UPA*, Baltimore.
- Schmeichel, Brandon J., Ryan Caskey et Joshua A. Hicks (2015). « Rational versus experiential processing of negative feedback reduces defensiveness but induces ego depletion », *Self and Identity*, vol. 14, no 1, p. 75-89.
- Schneider, Karen G (1996). « Children and information visualization technologies », *interactions*, vol. 3, no 5, p. 68-73.
- Sharples, Mike (2000). « The design of personal mobile technologies for lifelong learning », *Computers & Education*, vol. 34, no 3, p. 177-193.
- Shipman, Jean P, Sarah Barbara Watstein, Sophie Bury et Joanne Oud (2005). « Usability testing of an online information literacy tutorial », *Reference Services Review*, vol. 33, no 1, p. 54-65.
- Singer, Melissa A et Susan Goldin-Meadow (2005). « Children learn when their teacher's gestures and speech differ », *Psychological Science*, vol. 16, no 2, p. 85-89.
- Smeragliuolo, Anna H, N Jeremy Hill, Luis Disla et David Putrino (2016). « Validation of the leap motion controller using marked motion capture technology », *Journal of Biomechanics*.
- Stenning, Keith et Corin Gurr (1997). « Human-formalism interaction: Studies in communication through formalism », *Interacting with Computers*, vol. 9, no 2, p. 111-128.
- Sung, Han-Yu, Gwo-Jen Hwang et Yi-Fang Yen (2015). « Development of a contextual decision-making game for improving students' learning performance in a health education course », *Computers & Education*, vol. 82, p. 179-190.
- Sweller, John (1988). « Cognitive load during problem solving: Effects on learning », *Cognitive Science*, vol. 12, no 2, p. 257-285.
- Sweller, John, Paul Ayres et Slava Kalyuga (2011). « Interacting with the external environment: The narrow limits of change principle and the environmental organising and linking principle », dans *Cognitive load theory*, Springer, p. 39-53.
- Sweller, John, Jeroen J. G. van Merriënboer et Fred G. W. C. Paas (1998). « Cognitive architecture and instructional design » [journal article], *Educational Psychology Review*, vol. 10, no 3, p. 251-296.
- Taylor, Jamie et Kevin Curran (2015). « Using leap motion and gamification to facilitate and encourage rehabilitation for hand injuries: Leap motion for rehabilitation », *Handbook of Research on Holistic Perspectives in Gamification for Clinical Practice*, p. 183.

- Teasdale, Chantal (2004). «êtes-vous visuel, auditif ou kinesthésique?». [http://www.portailrh.org/votre\\_emploi/fiche\\_lapresse.aspx?f=21617](http://www.portailrh.org/votre_emploi/fiche_lapresse.aspx?f=21617)
- Thomas, HBG (1963). « Communication theory and the constellation hypothesis of calculation », *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, vol. 15, no 3, p. 173-191.
- Tiwari, RS et SN Deore (2009). « Imagination effect in teaching and learning of turing machine », *INSTRUCTIONAL TECHNOLOGY*, p. 3.
- Tomprowski, Phillip, Catherine Davis, Patricia Miller et Jack Naglieri (2008). « Exercise and children's intelligence, cognition, and academic achievement », *Educational Psychology Review*, vol. 20, no 2, p. 111-131.
- Travaglini, TA, PJ Swaney, Kyle D Weaver et RJ Webster III (2016). « Initial experiments with the leap motion as a user interface in robotic endonasal surgery », dans *Robotics and mechatronics*, Springer, p. 171-179.
- Valenzeno, Laura, Martha W Alibali et Roberta Klatzky (2003). « Teachers' gestures facilitate students' learning: A lesson in symmetry », *Contemporary Educational Psychology*, vol. 28, no 2, p. 187-204.
- Van Gerven, Pascal WM, Fred Paas, Jeroen JG Van Merriënboer et Henk G Schmidt (2004). « Memory load and the cognitive pupillary response in aging », *Psychophysiology*, vol. 41, no 2, p. 167-174.
- Wagner, Susan M, Howard Nusbaum et Susan Goldin-Meadow (2004). « Probing the mental representation of gesture: Is handwaving spatial? », *Journal of Memory and Language*, vol. 50, no 4, p. 395-407.
- Wallace, Harry M et Roy F Baumeister (2002). « The effects of success versus failure feedback on further self-control », *Self and Identity*, vol. 1, no 1, p. 35-41.
- Weale, RA (1986). « Aging and vision », *Vision Research*, vol. 26, no 9, p. 1507-1512.
- Wierwille, Walter W et F Thomas Eggemeier (1993). « Recommendations for mental workload measurement in a test and evaluation environment », *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 35, no 2, p. 263-281.
- Wilson, Margaret (2002). « Six views of embodied cognition », *Psychonomic bulletin & review*, vol. 9, no 4, p. 625-636.
- Xie, Bin et Gavriel Salvendy (2000). « Prediction of mental workload in single and multiple tasks environments », *International journal of cognitive ergonomics*, vol. 4, no 3, p. 213-242.
- Yanaka, Kazuhisa et Daichi Ishiguro (2015). « Natural user interface for board games using lenticular display and leap motion », dans *Hci international 2015-posters' extended abstracts*, Springer, p. 552-557.
- Zwaan, Rolf A et Lawrence J Taylor (2006). « Seeing, acting, understanding: Motor resonance in language comprehension », *Journal of Experimental Psychology: General*, vol. 135, no 1, p. 1.

## 8 Annexes

### Annexe 1 : Innovations technologiques destinées au domaine éducatif

Table 1. Technological developments available to education (based on Cox 2010, p. 144).

Dates/Era	Technological developments
1968	The creation of the Internet – ARPANET
1970–1977	Real-time interactive computers User graphics online computer terminals available at £5000 Internet connections for some schools via telecom lines and modems Remote access to computers from different locations International networks of computers through (JANET Joint Academic Network) Forerunners of desktop computers: e.g. Hewlett Packard, Horizon (formal and informal settings)
1977–1980	Miniaturization of computers and components – Production of small desktop computers: Horizon – £5000, Apple II – £1000, RML 380z £2000, IBM series – £2000 Acorn atom computer, Acorn BBC – Model A (8 k of memory) Acorn BBC model B (32 k of memory) – £400 Move from tape-based storage to disk-based storage of computer programs Prestel/Teletext – commercial and educational information provided online
1980–1984	First Apple-Macintosh produced – £1500 Fibre optics facilitating fast and large scale communication Expanding range of input and output devices for education, including: Concept keyboard/graphics tablets; Quinkey keyboard; Robot turtle; Tracker ball; Touch screens Speech input and output
1985–1987	Microsoft windows launched More powerful cheaper personal microcomputers IBM PC – (256 k of storage memory, 32 k processor memory) £1500 Mac II – (256 k of storage memory, 32 k processor memory) £1000 Invention of the World Wide Web by Tim Berners-Lee
1987–1990	New external storage devices: CD-ROM; Interactive video; Plug-in memory cards
1990–1995	Introduction of lap-top computers Major increase in storage memory devices and reduced costs (>1 Gbyte for £40) Spread of wireless computer technologies; wireless computer networks; air-mouse Development of video-conferencing
1996–1999	Introduction of the electronic interactive whiteboard Introduction of PDAs Universal growth of the uses of the Internet in education
2000–2004	Expansion of mobile hand-held technologies: PDAs, mobile phones, and MP3 players Development of molecular computing technology Development of quantum computers
2005–2007	Further increases in processing and storage of personal computers (5 G storage memory, >256 MHz processor) Thin client technologies in schools and colleges Development of haptics devices for use in education. Development of molecular computing technology Further increases in processing and storage of personal computers and miniaturization (10 G storage memory, >256 k processor) Widespread access to wireless networks and interactive whiteboards
2007–2011	Web2 technology – Social software environments: e.g. Wikipedia, Second Life Graphics portable devices: iPhone; BlackBerry; iPad; Satnav; MP3 players; e-books Social software: Facebook, Blogs; Twitter; social bookmarking; One World TV. Integration of mobile technologies with social software

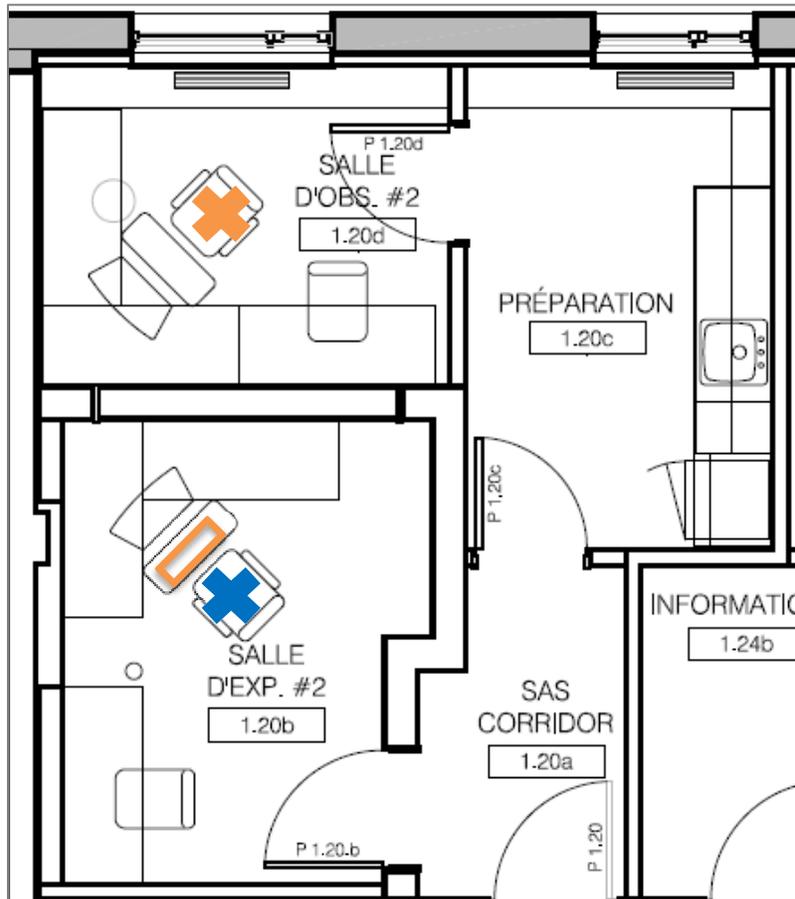
Source : Cox (2013 : 3), d'après Cox (2010) p.144

## Annexe 2: Visuel de l'interface HMH player 1.5

The screenshot displays the HMH Personal Math Trainer interface on an iPad. The title bar shows "Tech3Lab Practice Assignment 3" and "Personal Math Trainer". The main content area features a math problem: "Enter the sum." followed by the equation  $6 + 3 = \square$ . A red box labeled "Encadré 4" highlights the speaker icon next to the equation. To the right, a vertical sidebar contains several buttons: "View Example", "Step by Step", "Textbook", and "Print", all enclosed in a red box labeled "Encadré 3". At the bottom of the interface, there are two buttons: "Check Answer" (with a green checkmark icon) and "Next" (with a right arrow icon), both enclosed in red boxes labeled "Encadré 1" and "Encadré 2" respectively. The status bar at the bottom indicates "Question 1 of 10".

Source : HMH

### Annexe 3: Configuration de la salle de collecte de données

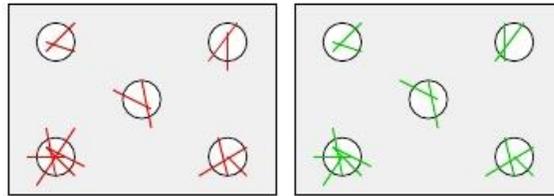


Source : Tech3Lab

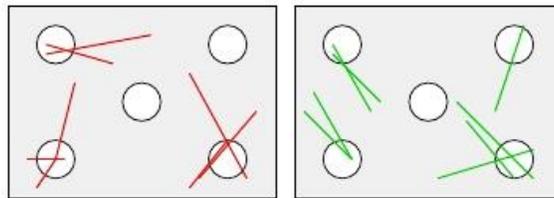
-  Emplacement du participant
-  Emplacement du chercheur
-  Oculomètre

Annexe 4 : Exemple de calibration oculométrique en 5 points

**Be Sure Your Data is Collected Accurately**



Good Calibration



Poor Calibration

## Annexe 5: Affiche de recrutement



**CHILDREN IN SECOND GRADE TO PARTICIPATE IN A  
SCIENTIFIC STUDY ON THE USE OF IPAD IN LEARNING MATH!**

We are looking for English-speaking children between the ages of 7 and 8 years registered in 2<sup>nd</sup> grade for a scientific research project studying the learning of mathematics.

Accompanied by their parents, children must be available during the weekend to participate. **The experiment will last one (1H30) hour and a half at the Tech3Lab-HEC Montreal, on the weekends of November (7, 8, 14, 15, 21, 22, 28 & 29) and December (5, 6, 12, 13, 19 & 20).** In the study, children will have to answer mathematical questions on a tablet (iPad). **Participants will receive \$ 50 and a free textbook as compensation.**

**To register for this study, register on the website below: <https://goo.gl/y5WX5j>.** The selected participants will be contacted by our research team.

This project is under the supervision of Professor Pierre-Majorique Léger. He can be reached by email at [pierre-majorique.leger@hec.ca](mailto:pierre-majorique.leger@hec.ca). This research project was approved by the Ethics Research Council of HEC Montreal.

Source : Tech3Lab

## Annexe 6 : Normalisation des variables

a. «ecart-type\_pupillaire»

stats	sd Pupil	ln dm sd Pupil	inv sd Pupil
mean	0,1197	6,8098	0,8986
sd	0,0987	0,8016	0,0644
p50	0,0984	6,8931	0,9104
min	0,0058	4,0730	0,4870
max	1,0535	9,2625	0,9943
N	266	266	266
skewness	<b>4,1333</b>	-0,6675	-1,6327
kurtosis	<b>35,3655</b>	3,8406	9,7081

b. «nombre\_pointages»

stats	Count_Comport_ Pointer	ln_Count_Comport_ Pointer	sqrt_Count_Comport_ Pointer	inv_Count_Comport_ Pointer
mean	0,1462	0,0470	1,0380	0,9750
sd	1,2159	0,2760	0,2620	0,1260
p50	0,0000	0	1	1
min	0,00	0,0000	1,0000	0,0630
max	15,00	2,7730	4,0000	1,0000
N	171	171	171	171
skewness	<b>11,1387</b>	7,5700	9,4800	-5,3190
kurtosis	<b>133,2766</b>	66,8960	101,0410	31,8590

c. «duree\_compter»

stats	Total_Last_Compter	ln_Total_Last_Compter	sqrt_Total_Last_ Compter	inv_Total_Last_ Compter
mean	4,5349	0,6510	1,7570	0,7810
sd	11,7147	1,2160	1,5690	0,3930
p50	0,0000	0	1	1
min	0,00	0,000	1,0000	0,0110
max	92,92	4,5420	9,6910	1,0000
N	171	171	171	171
skewness	<b>4,1546</b>	1,5190	2,3000	-1,2380
kurtosis	<b>25,3008</b>	3,7560	8,3960	2,5580

**Annexe 7 : Tableau de fréquences des valeurs manquantes de nos variables comportementales**

a. «pointer»

<b>Numéro du participant</b>	<b>Fréquence</b>	<b>Pourcentage</b>
1	18	16.51
9	12	11.01
10	4	3.67
11	6	5.50
12	15	13.76
13	17	15.60
17	18	16.51
20	19	17.43
Total	109	100.00

b. «nombre\_pointages»

<b>Numéro du participant</b>	<b>Fréquence</b>	<b>Pourcentage</b>
1	18	16.51
9	12	11.01
10	4	3.67
11	6	5.50
12	15	13.76
13	17	15.60
17	18	16.51
20	19	17.43
Total	109	100.00

c. «compter»

<b>Numéro du participant</b>	<b>Fréquence</b>	<b>Pourcentage</b>
1	18	16.51
9	12	11.01
10	4	3.67
11	6	5.50
12	15	13.76
13	17	15.60
17	18	16.51
20	19	17.43
Total	109	100.00

d. «interruption\_compter»

<b>Numéro du participant</b>	<b>Fréquence</b>	<b>Pourcentage</b>
1	18	16.51
9	12	11.01
10	4	3.67
11	6	5.50
12	15	13.76
13	17	15.60
17	18	16.51
20	19	17.43
Total	109	100.00

e. «duree\_compter»

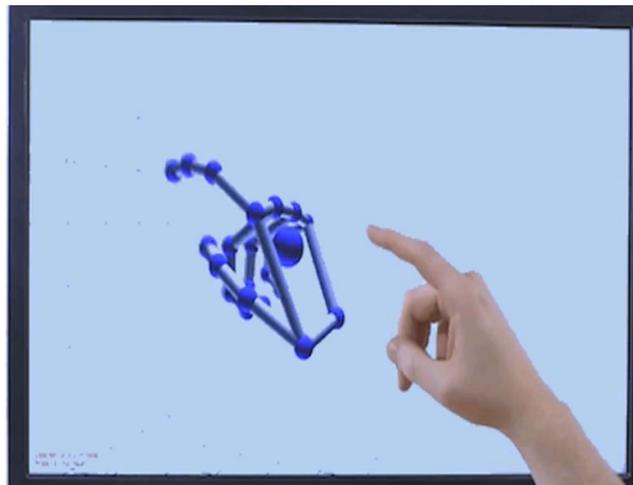
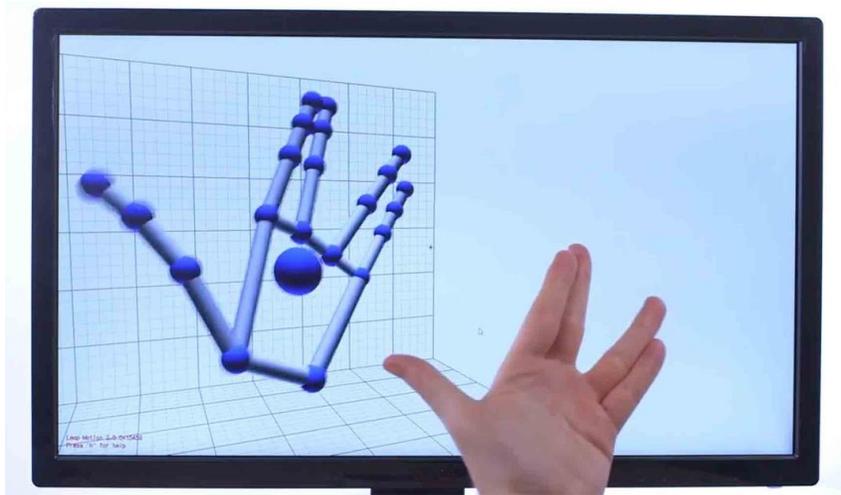
<b>Numéro du participant</b>	<b>Fréquence</b>	<b>Pourcentage</b>
1	18	16.51
9	12	11.01
10	4	3.67
11	6	5.50
12	15	13.76
13	17	15.60
17	18	16.51
20	19	17.43
Total	109	100.00

**Annexe 8 : Tableau de fréquences de la durée du dénombrement, variable  
«Duree\_Compter»**

«Duree_Compter»	Fréquence	Pourcentage
0,00	791	70,94
2,12	4	0,36
3,46	4	0,36
4,48	4	0,36
5,00	4	0,36
5,68	4	0,36
5,82	4	0,36
6,00	4	0,36
6,04	1	0,09
6,27	4	0,36
6,38	4	0,36
6,57	4	0,36
7,00	9	0,81
7,08	4	0,36
8,00	3	0,27
8,07	4	0,36
8,28	4	0,36
8,79	4	0,36
8,86	5	0,45
9,00	4	0,36
9,46	4	0,36
9,98	5	0,45
10,00	7	0,63
10,54	3	0,27
10,63	2	0,18
11,19	4	0,36
11,68	5	0,45
12,39	4	0,36
12,4	5	0,45
12,89	3	0,27
12,94	4	0,36
13,25	4	0,36
14,37	5	0,45
14,73	4	0,36
15,22	5	0,45
15,41	2	0,18
15,56	5	0,45
16,42	4	0,36

16,52	3	0,27
16,97	2	0,18
17,01	5	0,45
17,08	4	0,36
18,12	4	0,36
18,33	5	0,45
18,88	3	0,27
18,90	5	0,45
19,57	4	0,36
19,64	4	0,36
20,90	4	0,36
21,10	4	0,36
22,15	4	0,36
22,49	4	0,36
22,84	2	0,18
22,89	3	0,27
23,03	4	0,36
23,08	5	0,45
24,39	5	0,45
26,27	4	0,36
26,93	3	0,27
28,00	4	0,36
28,25	5	0,45
28,28	4	0,36
28,93	4	0,36
30,28	4	0,36
31,83	4	0,36
32,00	5	0,45
32,58	5	0,45
36,01	5	0,45
39,77	5	0,45
40,48	4	0,36
41,19	4	0,36
42,90	4	0,36
44,96	5	0,45
62,90	4	0,36
76,73	5	0,45
92,92	4	0,36
105,02	5	0,45
107,14	5	0,45
116,04	5	0,45
Total	1,115	100

**Annexes 9 : Illustration du «Leap Motion»**



*Source :Ladyada (2017)*