



**HAL**  
open science

# Tâche, contexte, inhibition : le jeune enfant face au transfert d'apprentissage sur tablette numérique

Wilfried Mombo

► **To cite this version:**

Wilfried Mombo. Tâche, contexte, inhibition : le jeune enfant face au transfert d'apprentissage sur tablette numérique. Psychologie. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2021. Français. NNT : 2021GRALS040 . tel-03660622

**HAL Id: tel-03660622**

**<https://theses.hal.science/tel-03660622v1>**

Submitted on 6 May 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## **THÈSE**

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES**

Spécialité : **PCN - Sciences cognitives, psychologie et neurocognition**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

**Wilfried Thierry MOMBO**

Thèse dirigée par **Jérôme CLERC**

Préparée au sein du **Laboratoire de Psychologie et Neuro Cognition (LPNC)**  
dans l'**École Doctorale Ingénierie pour la Santé la Cognition et l'Environnement (EDISCE)**

**Tâche, contexte, inhibition : le jeune enfant face au transfert d'apprentissage sur tablette numérique**

Thèse soutenue publiquement le 15 décembre 2021,

devant le jury composé de :

**Sandrine ROSSI**

Professeure de Psychologie Cognitive et de l'Education, Université de Caen Normandie (Présidente du Jury)

**Jérôme CLERC**

Professeur de Psychologie Cognitive, Université Grenoble Alpes (Directeur de thèse)

**Jean-Pierre THIBAUT**

Professeur de Psychologie du Développement, Université de Bourgogne (Rapporteur)

**André TRICOT**

Professeur de Psychologie Cognitive, Université Paul-Valéry Montpellier 3 (Rapporteur)

**Evelyne CLEMENT**

Professeure de Psychologie Cognitive, CY Cergy Paris Université (Examinatrice)

**Sylvie AKIGUET-BAKONG**

Maître de conférences (CAMES) de Psychologie Cognitive, Université Omar Bongo (Examinatrice)

*Il ne parait plus possible aujourd'hui de concevoir un dispositif éducatif sans prendre en considération les apports de la psychologie, (Crahay, 2013, page.4).*

## **Dédicace**

*À mon défunt père,*

***Feu MOMBO François***

*Compagnon indéfectible de mes premiers pas dans la vie. À toi papa, l'irremplaçable, toi qui, avec allégresse et amour, m'a conduit sur le chemin de l'école. Papa, trouve dans ce travail de thèse, l'expression de ton passage sur terre.*

## Remerciements

Les exigences et la complexité d'une recherche scientifique, me fait constater qu'il est impératif d'être encadré scientifiquement et encouragé moralement tout au long d'une recherche doctorale. A ce titre, je tiens à remercier toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, m'ont soutenu tout au long de cette aventure scientifique.

Je tiens à remercier Monsieur **Jérôme CLERC**, professeur de psychologie cognitive, pour la confiance qu'il m'a accordée, pour le temps qu'il m'a consacré, pour sa patience, la rigueur scientifique qu'il m'a inculquée, ses précieux conseils, et son aide multiforme. Par la pédagogie dont il a fait preuve, il m'a permis de me dépasser, de surmonter les échecs rencontrés durant cette recherche doctorale. Je le remercie donc pour son encadrement scientifique et moral qui a sans aucun doute apporté une valeur ajoutée à cette thèse.

Mes remerciements vont également à l'endroit des membres du jury, Mesdames **Evelyne CLÉMENT**, **Sandrine ROSSI**, **Sylvie AKIGUET-BAKONG**, Messieurs **André TRICOT** et **Jean-Pierre THIBAUT** qui ont accepté de lire et d'expertiser mon travail. C'est un immense honneur et je les en remercie.

Pour les merveilleux moments d'échanges et de partage qui ont rendu ces années de thèse agréables, je tiens à remercier tous les doctorants du LPNC. Remerciements particuliers à **Cynthia**, **Léa**, **Adeline**, **Candice** et **Elie**. Aux membres de mon Comité de Suivi Individuel **Martial MERMILLOD** et **Jean-Charles QUINTON**, merci pour vos critiques et vos suggestions.

Je tiens également à remercier mes sœurs, frères, et amis de toujours, pour leurs encouragements et leur soutien indéfectible de tous les jours et plus encore tout au long de ces années de thèse. Merci particulièrement à **Samantha**, **Alexia**, **Grace**, **Eliau**, **Emérica**, **Albin-Baptiste**, **Eric-Fiacre**, **Franck**, **Paterne**. À vous **Pascal** et **Charlay**, merci de m'avoir tenu la main à mon arrivée. Je ne cesse d'apprendre de vous !

Il serait ingrat de ma part de ne pas remercier toutes les écoles et tous les parents d'enfants qui ont accepté de me laisser travailler avec leurs élèves, leurs enfants. Un grand merci particulier à tous les enfants qui ont bien voulu participer à ces différentes études. A **Sadok BEN FREDJ** et **Silvestre VICTOR**, grand merci pour votre collaboration et le développement de l'application de la Tour de Hanoï.

Enfin, pour leur amour incommensurable, je tiens à remercier mes parents, qui ont toujours cru en moi et ne ménagent aucun effort pour m'accompagner dans les grands moments de ma vie. Je ne vous remercierai jamais assez !

## Résumé

Dans cette thèse, nous avons voulu répondre à un questionnement : est-il possible d'observer un transfert d'apprentissage sur tablette numérique chez l'enfant, dans le cas de la Tour de Hanoï (TdH) ? Conformément au modèle de Klahr et Chen (2011), ce transfert numérique est-il soumis aux effets de similarités entre tâches et contextes, comme observé dans le transfert entre tâches tangibles ? De plus, au regard du rôle de l'inhibition dans le contrôle des interférences, l'inhibition contribue-t-elle à ce transfert ?

Pour répondre à ces questions, trois études ont été menées auprès d'enfants de 6 à 7 ans français et gabonais. Les résultats ont montré que, comme pour le transfert entre tâches tangibles, le transfert numérique est caractérisé par une baisse de performances temporaire. Cette baisse de performances lors du passage à la tâche de transfert peut néanmoins être limitée par un entraînement spécifique (étude 1), une similarité des supports de présentation des tâches (étude 2), et une similarité conjointe des tâches et de leurs contextes numériques de présentation (étude 3). Dans les trois études, on note également que le contrôle inhibiteur (Diamond, 2013) contribue à limiter cette baisse.

Cette thèse a en outre permis de tester la validité du modèle de Klahr et Chen (2011) dans le cas d'un transfert numérique. Dans cette perspective, ce travail a montré qu'apprendre sur une tablette ne garantit pas le transfert de l'apprentissage. Il faut que la nouvelle tâche soit également réalisée sur une tablette numérique, ce qui nuance l'hypothèse d'un effet facilitateur des tablettes numériques sur le transfert d'apprentissage. La contribution de l'inhibition au transfert d'apprentissage est attestée par les résultats obtenus, prolongeant des travaux antérieurs (Borst & Houdé, 2014). Les résultats sont discutés sur le plan théorique et en termes d'implications pratiques et pédagogiques.

Mots-clés : Transfert d'apprentissage, tablette numérique, baisse de performances, inhibition, Tour de Hanoï.

## **Abstract**

This thesis addresses the issue of digital transfer. Is it possible to observe a transfer of learning on a digital tablet in children, in the case of the Tower of Hanoi ? Consistent with Klahr and Chen's (2011) model, is such a transfer determined by similarities between tasks and contexts, as observed in transfer between tangible tasks? Furthermore, in line with research showing the role of inhibition in interference control, does inhibition contribute to this transfer?

To answer these questions, three studies were conducted with French and Gabonese children aged 6 to 7. The results showed that, as for the transfer between tangible tasks, the digital transfer is characterized by a temporary decrement in performance. This decrement in performance during the transition to the transfer task can nevertheless be limited by specific training (study 1), similarity of the task presentation modalities (study 2), and a joint similarity of tasks and their digital contexts of presentation (study 3). In all three studies, we also showed that inhibitory control (Diamond, 2013) helps to limit this decrement.

This thesis further tested the validity of Klahr and Chen's (2011) model in the case of digital transfer. This work showed that learning on a digital tablet does not guarantee that transfer of learning will occur. The new task must also be performed on a digital tablet, which qualifies the hypothesis of a facilitating effect of digital tablets on transfer of learning. The contribution of inhibition in transfer of learning is attested by the results obtained, extending previous work (Borst & Houdé, 2014). The results are discussed theoretically and in terms of practical and pedagogical implications.

Key words : Transfer of learning, digital tablet, decrement in performance, inhibition, Tower of Hanoi.

## TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>13</b>
<b>CHAPITRE 1 : LES SUPPORTS NUMERIQUES COMME OUTILS D'APPRENTISSAGE ..</b>	<b>21</b>
1.1. Généralités.....	21
1.2. La Théorie cognitive de l'apprentissage multimédia de Mayer .....	23
1.3. La tablette numérique tactile : un outil avec des spécificités .....	31
1.3.1. Conception ergonomique des apprentissages numériques : le cas des applications.....	37
1.3.1.1. <i>Apprentissage actif</i> .....	38
1.3.1.2. <i>Apprentissage significatif</i> .....	39
1.3.1.4. <i>L'apprentissage engagé</i> .....	41
1.3.1.5. <i>Les feedbacks</i> .....	42
1.4. Appareils numériques et apprentissage .....	46
1.4.1. De la possibilité d'une amélioration du développement cognitif .....	46
1.4.2. De la facilité d'apprentissage .....	49
<b>CHAPITRE 2 : TRANSFERT D'APPRENTISSAGE.....</b>	<b>53</b>
2.1. Généralités.....	53
2.2.1. La similarité des tâches .....	54
2.2.1.1. <i>Similarité de surface</i> .....	55
2.2.1.2. <i>Similarité de structure</i> .....	56
2.2.2. Similarité des contextes.....	57
2.2.3. L'intervalle temporel.....	58
2.2.4. Near transfer vs Far transfer .....	60
2.3. La dimension adaptative du transfert .....	63
2.4. Le phénomène de baisse de performances au transfert .....	68
2.5. Supports numériques et transfert d'apprentissage .....	71
2.7. La Tour de Hanoï .....	76
2.7.1. Considérations préliminaires .....	76
2.7.2. Le problème dit de la Tour de Hanoï.....	77
2.7.2.1. <i>Le modèle des contraintes</i> .....	81
2.7.2.2. <i>Tour de Hanoï et transfert numérique</i> .....	83
<b>CHAPITRE 3 : RÔLE DE L'INHIBITION DANS LE DÉVELOPPEMENT COGNITIF ET LES APPRENTISSAGES CHEZ L'ENFANT .....</b>	<b>85</b>
3.1. Généralités.....	85
3.2. Le caractère unitaire et dissociable des FE.....	86
3.3. Contrôle inhibiteur : inhibition des réponses prédominantes .....	89
3.4. Contrôle inhibiteur et développement .....	89
3.4.1. Modèle de Diamond (2013).....	89

3.4.1.1. <i>L'inhibition de la réponse</i> .....	91
3.4.1.2. <i>Le contrôle des interférences</i> .....	93
3.4.1.2.1. <i>Le contrôle inhibiteur de l'attention</i> .....	93
3.4.1.2.2. <i>L'inhibition cognitive</i> .....	94
3.4.2. <i>Modèle de Houdé (2000)</i> .....	96
3.4.2.1. <i>Le système heuristique</i> .....	98
3.4.2.2. <i>Le système algorithmique</i> .....	99
3.4.2. 3. <i>Le système d'inhibition</i> .....	99
3.5. <i>Développement du contrôle inhibiteur</i> .....	103
3.5.1. <i>Le contrôle inhibiteur de 0 à 3 ans</i> .....	103
3.5.2. <i>Le contrôle inhibiteur chez l'enfant de 4-5 ans : un pic de développement</i> .....	106
3.5.3. <i>Le contrôle inhibiteur chez les enfants jusqu'à l'âge adulte (6 ans et plus)</i> .....	107
3.6. <i>Contrôle inhibiteur et apprentissages scolaires</i> .....	108
3.7. <i>Contrôle inhibiteur et transfert numérique</i> .....	112
3.8. <i>Problématique</i> .....	115
<b>CHAPITRE 4 : ETUDE 1. TRANSFERT NUMERIQUE ENTRE DIFFERENTES VERSIONS DE LA TOUR DE HANOÏ CHEZ L'ENFANT : EFFET DE L'ENTRAINEMENT SPECIFIQUE ET ROLE DE L'INHIBITION COGNITIVE</b> .....	<b>122</b>
4.1. <i>Objectifs</i> .....	122
4.2. <i>Méthode</i> .....	123
4.2.1. <i>Participants</i> .....	123
4.2.2. <i>Matériel</i> .....	123
4.2.3. <i>Procédure</i> .....	127
4.3. <i>Résultats</i> .....	130
4.3.1. <i>Analyse des mouvements</i> .....	131
4.3.2. <i>Analyse des scores d'inhibition</i> .....	137
4.4. <i>Discussion</i> .....	138
4.5. <i>Conclusion</i> .....	146
<b>CHAPITRE 5 : ETUDE 2. TRANSFERT D'APPRENTISSAGE ENTRE VERSIONS NUMERIQUE ET TANGIBLE DE LA TOUR DE HANOÏ CHEZ L'ENFANT : SIMILARITE DES SUPPORTS ET RÔLE DE L'INHIBITION COGNITIVE</b> .....	<b>147</b>
5.1. <i>Objectifs</i> .....	147
5.2. <i>Méthode</i> .....	148
5.2.1. <i>Participants</i> .....	148
5.2.2. <i>Matériel</i> .....	149
5.2.3. <i>Procédure</i> .....	151
5.3. <i>Résultats</i> .....	153
5.3.1. <i>Analyse des mouvements</i> .....	153

5.3.2. Analyse des scores d'inhibition.....	158
5.4. Discussion .....	161
5.5. Conclusion.....	169
<b>CHAPITRE 6 : ETUDE 3. TRANSFERT NUMERIQUE CHEZ L'ENFANT : SIMILARITE DES TACHES ET DES INTERFACES GRAPHIQUES, ET CONTRIBUTION DE L'INHIBITION COGNITIVE .....</b>	<b>172</b>
6.1. Objectifs .....	172
6.2. Méthode.....	173
6.2.1. Participants .....	173
6.2.2. Matériel .....	173
6.2.3. Procédure.....	176
6.3. Résultats .....	177
6.3.1. Analyse des mouvements .....	179
6.3.2. Analyse des temps de résolution .....	182
6.3.3. Analyse des scores d'intelligence et des scores d'inhibition.....	183
6.4. Discussion .....	187
6.5. Conclusion.....	194
<b>CHAPITRE 7 : DISCUSSION GENERALE.....</b>	<b>196</b>
7.1. Entraînement à la tâche principale .....	196
7.2. Similarité des tâches ainsi que des supports de présentation : numérique vs tangible .....	199
7.3. Similarité des tâches ainsi que des contextes numériques.....	202
7.4. Pattern de regain de performances .....	205
7.6. Limites et perspectives .....	210
7.7. Implications générales de la thèse .....	214
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>217</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>218</b>
<b>Annexe 1: Avis du Comité d'éthique en sciences comportementales.....</b>	<b>244</b>
<b>Annexe 2 : Test d'inhibition comportementale HTKS (Ponitz et al., 2009).....</b>	<b>245</b>
<b>Annexe 3 : Avis du Comité d'Ethique pour la Recherche Grenoble Alpes.....</b>	<b>252</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.</b> Modèle hypothétique des facteurs pouvant permettre de résister à la baisse de performances au transfert numérique.....	19
<b>Figure 2.</b> La théorie cognitive de l'apprentissage multimédia (CTLM) de Mayer (2005, 2008).....	24
<b>Figure 3.</b> Un critère de l'intuitivité cognitive : la familiarité, tirée de Baccino et Draï-Zerbib (2012). 34	
<b>Figure 4.</b> Les domaines de l'expérience utilisateur, tirée de Brangier et Bastien (2010).....	37
<b>Figure 5.</b> Modèle du transfert tridimensionnel de Klahr et Chen (2011). ....	54
<b>Figure 6.</b> Taxonomie du transfert lointain, tirée de Barnett et Ceci (2002).....	68
<b>Figure 7.</b> Etats de résolution du problème de la Tour de Hanoï, tirée de Zanga, Richard, et Tijus (2004). ....	78
<b>Figure 8.</b> Le contrôle inhibiteur intégré aux autres fonctions exécutives selon Diamond (2013), adapté par Linzarini (2017).....	90
<b>Figure 9.</b> Exemple d'une tâche de Go/NoGo, tiré de St. John, Finch, & Tarullo (2019).....	92
<b>Figure 10.</b> Exemple de Flankers, tiré de Yoshida, Tran, Benitez et Kuwabara (2011). ....	94
<b>Figure 11.</b> Modèle de Houdé et Borst (2015). ....	98
<b>Figure 12.</b> Exemple du paradigme d'amorçage négatif dans une tâche de catégorisation, tiré de Borst, Poirel, Pineau, Cassoti, et Houdé (2013).....	102
<b>Figure 13.</b> Version numérique de la Tour de Hanoï à trois disques. ....	124
<b>Figure 14.</b> Version numérique de la Tour de Hanoï à trois carrés.....	125
<b>Figure 15.</b> Tâche de l'empilement de disques. ....	125
<b>Figure 16.</b> Jeu du memory. ....	126
<b>Figure 17.</b> Nombre moyen de mouvements à chaque essai en fonction du type d'entraînement. Les barres d'erreur représentent les erreurs-types.....	133
<b>Figure 18.</b> Liens prédictifs entre les score d'inhibition et le nombre de mouvements à l'essai 1 du prétest. ....	137
<b>Figure 19.</b> Liens prédictifs entre les scores d'inhibition et le nombre de mouvements à l'essai 1 de transfert.....	138
<b>Figure 20.</b> Version tangible de la Tour de Hanoï à trois carrés.....	149
<b>Figure 21.</b> Version tangible de la Tour de Hanoï à trois disques. ....	150
<b>Figure 22.</b> Cartes du test d'inhibition Day and Night.....	151
<b>Figure 23.</b> Nombre moyen de mouvements à chaque essai en fonction du type de support. Les barres d'erreur représentent les erreurs-types. ....	155
<b>Figure 24.</b> Liens prédictifs entre les scores d'inhibition et le nombre de mouvements à l'essai 1 de transfert.....	159
<b>Figure 25.</b> Liens prédictifs entre les scores d'inhibition et le de mouvements à l'essai 2 de transfert. ....	159

<b>Figure 26.</b> Liens prédictifs entre les scores d'inhibition et le nombre de mouvements à l'essai 3 de transfert.....	160
<b>Figure 27.</b> Liens prédictifs entre les scores d'inhibition et le nombre de mouvements à l'essai 4 de transfert.....	160
<b>Figure 28.</b> Copie d'écran des trois versions de la Tour de Hanoï numérique présentées dans les trois contextes numériques, avec de gauche à droite les trapèzes présentés dans le contexte « cocotiers », les rectangles présentés dans le contexte « arbustes », les disques présentés dans le contexte « maisons ».	174
<b>Figure 29.</b> Nombre de mouvements dans chaque condition selon les essais. Les barres d'erreur représentent les erreurs-types. ....	180
<b>Figure 30.</b> Liens prédictifs entre les scores d'intelligence (PM47) et le nombre de mouvements à l'essai 1 de la tâche principale.....	184
<b>Figure 31.</b> Liens prédictifs entre les scores d'inhibition de réponse comportementale (HTKS) et le nombre de mouvements à l'essai 1 de la tâche principale.....	184
<b>Figure 32.</b> Liens prédictifs entre les scores d'inhibition cognitive (Day and Night) et le nombre de mouvements à l'essai 1 de la tâche principale.....	185
<b>Figure 33.</b> Liens prédictifs entre les scores d'inhibition de réponse comportementale (HTKS) et le nombre de mouvements à l'essai 1 de transfert.....	186
<b>Figure 34.</b> Liens prédictifs entre les scores d'inhibition cognitive (Day and Night) et le nombre de mouvements à l'essai 1 de transfert.....	186

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1.</b> Statistiques descriptives, corrélations des variables temps et nombre de mouvements. ....	136
<b>Tableau 2.</b> Statistiques descriptives, corrélations des variables temps et nombre de mouvements. ....	157
<b>Tableau 3.</b> Effet prédictif de l'inhibition sur le nombre de mouvements aux essais de transfert.....	158
<b>Tableau 4.</b> Effet prédictif de l'inhibition sur le nombre de mouvements aux essais de la tâche principale.....	158

---

## INTRODUCTION GENERALE

---

Montessori nous rappelle que, « *L'enfant nous demande de l'aider à agir tout seul.* » Autrement dit, le but de l'éducation est d'amener progressivement l'enfant à être autonome devant des situations-problèmes. Le système scolaire a en effet pour mission de fournir à l'enfant un cadre formel pour développer ses compétences. Parmi celles-ci, la capacité à transférer un apprentissage d'une première tâche à une seconde est cruciale, car elle est un gage d'autonomie devant toute nouvelle tâche rencontrée à l'école ou dans la vie quotidienne. Transférer un apprentissage nécessite néanmoins une adaptation active de la connaissance à la seconde tâche, cette adaptation étant difficile et cognitivement coûteuse (Nokes, 2009). Le transfert d'apprentissage est donc une compétence-clé dans la réussite scolaire, mais la difficulté qu'il représente fait qu'il est souvent échoué, en particulier chez de jeunes enfants. De plus, l'école doit fournir à l'élève des méthodes pour résoudre de façon autonome les problèmes nouveaux auxquels il fera face, mais elle doit aussi l'amener à utiliser des supports d'apprentissage variés lui permettant d'apprendre et de transférer. Parmi ces supports, les supports numériques ont pris une place importante dans les apprentissages et leurs transferts.

Avec l'avènement des outils numériques, la question des supports d'apprentissage se pose avec beaucoup d'acuité chez l'enfant (Barr, 2010; Mayer, 2016). Aujourd'hui, il est difficile de contrôler l'usage des appareils numériques par les enfants, en l'occurrence leur rapport aux smartphones et tablettes numériques. Ils peuvent à tout moment par exemple télécharger des applications, jouer à n'importe quel jeu en dépit des restrictions des parents (Radesky & Christakis, 2016).

Le caractère multitâche des tablettes numériques suscite un intérêt pour les enfants, car ces appareils leur offrent la possibilité de se divertir en même temps qu'ils apprennent. Les tablettes numériques apparaissent comme une variante non négligeable pour l'éducation des enfants (Rideout, Foehr, & Roberts, 2010). Dans cette perspective, au même titre qu'il n'est

pas logique de séparer l'étude du développement de l'enfant de ses interactions avec le monde dans lequel il vit, il ne serait pas logique de séparer l'étude des apprentissages de l'enfant de ses interactions avec le numérique (Durkin & Blades, 2009). Au contraire, les chercheurs devraient jeter un regard attentif aux interactions enfant-numérique, afin d'en déduire les conséquences idoines sur les apprentissages des enfants, dont la finalité est le transfert à différentes tâches. Dans ce sens, l'émergence des supports numériques a engendré de nouvelles problématiques, liées au rôle des supports d'apprentissage dans le transfert. Une connaissance acquise dans une tâche présentée avec un support numérique est-elle facilement transférée à une tâche présentée sur un support tangible ? Qu'en est-il du mouvement inverse, c'est-à-dire du tangible vers le numérique ? La problématique du transfert d'apprentissage se trouve ainsi renouvelée à l'ère du numérique.

Depuis plus d'un siècle, des chercheurs s'intéressent au moyen par lequel l'individu parvient à résoudre des nouveaux problèmes à partir de ses connaissances antérieures (Thorndike & Woodworth, 1901). En psychologie, on utilise le concept de transfert d'apprentissage pour rendre compte d'une telle activité cognitive. Le transfert d'apprentissage est la capacité des individus à ré-utiliser une connaissance acquise dans une tâche antérieure pour réaliser une nouvelle tâche, similaire à celle à laquelle ils ont déjà été confrontés (Chi & Vanlehn, 2012). Le transfert d'apprentissage met donc en jeu une tâche principale dans laquelle l'individu acquiert la connaissance et une tâche de transfert dans laquelle il ré-utilise la connaissance acquise. Typiquement, les deux tâches n'ont en commun que leur structure, c'est-à-dire le principe de résolution, mais n'ont pas les mêmes éléments de surface, c'est-à-dire l'habillage. Cette différence de surface nécessite une adaptation de l'apprentissage antérieur à la nouvelle tâche pour que le transfert soit réussi. Cela suppose que l'enfant soit capable d'identifier parmi ses connaissances en mémoire, celles qui sont pertinentes pour résoudre un

problème. Il doit ainsi se servir de ce qu'il sait déjà pour accéder à ce qu'il ne sait pas encore, ce qui rend le transfert difficile pour l'enfant.

Pour expliquer la qualité du transfert, la psychologie cognitive se réfère à la nature et au nombre de similarités que partagent les tâches. La probabilité de réussir le transfert est grande lorsque les similarités entre une tâche principale et une tâche de transfert sont nombreuses (Clerc & Leconte, 2005). Pour Klahr et Chen (2011), parce que les tâches sont toujours présentées en contexte, il est également nécessaire d'intégrer une dimension contextuelle à l'explication de la qualité du transfert. Plus les contextes sont similaires entre les deux tâches, plus la probabilité de réussir le transfert est grande. La double similarité des tâches et des contextes de présentation apparaît dès lors comme un facteur explicatif de la réussite du transfert. La notion de contexte intègre par ailleurs le support d'apprentissage, et en particulier le support numérique (Huber et al., 2016; Moser et al, 2015). Ceci pose la question du transfert d'apprentissage à partir d'un support numérique vers un support tangible. Cette situation correspond à un type de transfert que nous qualifierons de transfert numérique, encore relativement peu étudié. Nous appelons transfert numérique toute situation de transfert d'apprentissage comprenant au moins une tâche réalisée sur support numérique, qu'il s'agisse de la tâche principale ou de la tâche de transfert. Nous reviendrons sur ce point dans la partie théorique.

Le transfert numérique implique une différence de supports de présentation entre la tâche principale et la tâche de transfert. Or, pour que le transfert soit réussi, les tâches doivent avoir en commun plusieurs éléments. En l'absence de fortes similarités entre les tâches et entre leurs contextes de présentation, le transfert est faible (Barnett & Ceci, 2002 ; Klahr & Chen, 2011), voire s'accompagne d'une baisse transitoire de performances. Une telle baisse a été observée dans plusieurs études relevant de différents domaines du transfert d'apprentissage chez l'enfant, qu'il s'agisse de transfert analogique (Brown & Kane, 1988), de transfert

implicite (Perruchet & Vinter, 2002), de transfert stratégique (Clerc, 2013), ou de transfert moteur (Adi-Japha & Brestel, 2020).

Curieusement, ce phénomène de baisse de performances au transfert est encore peu étudié chez l'enfant avec des tâches de résolution de problème, comme la classique tâche de la Tour de Hanoï, qui est pourtant largement utilisée dans le domaine de la résolution de problème et du raisonnement.

La Tour de Hanoï est difficile pour l'enfant, car elle nécessite des bonnes capacités de planification et d'exécution, qui par ailleurs se développent lentement. Certains chercheurs suggèrent d'ailleurs de présenter cette tâche dans un contexte sémantique, avec un support plus familier pour l'enfant, afin de l'aider à la résoudre (Klahr & Robinson, 1991) et transférer la stratégie acquise à une version différente (Clément, 2001). Néanmoins, lorsque deux variantes de cette tâche sont présentées avec des supports différents, comme c'est le cas dans le transfert numérique, on pourrait s'attendre à une baisse de performances au transfert. Or, la finalité d'un apprentissage étant son transfert, lorsque celui-ci ne s'opère pas correctement, il convient d'en déterminer la cause et, in fine, de tenter d'éviter cette baisse par des interventions ciblées.

Par ailleurs, dans un des paradigmes expérimentaux les plus utilisés pour étudier le transfert, la tâche de transfert et la tâche principale ne sont différentes que par leurs éléments de surface. Les éléments de structure eux sont identiques. Les deux tâches sont alors dites isomorphes. Pour réaliser le transfert d'une connaissance de l'une à l'autre, l'enfant doit comprendre la structure de la tâche de transfert et établir une correspondance avec celle de la tâche principale : pour ce faire, l'enfant doit contrôler les interférences causées par la dissimilarité de surface entre les tâches (Schwartz, Chase, & Bransford, 2012). Dans le transfert numérique, ces interférences peuvent être accentuées par la différence de supports de présentation si une tâche est présentée sur support numérique et l'autre sur support tangible. D'autre part, les éléments de décor qui environnent la tâche sur l'interface graphique peuvent

être différents d'une tâche à l'autre, y compris dans le cas où les deux tâches sont présentées sur support numérique. Il est donc nécessaire pour l'enfant de contrôler ces interférences. Le contrôle des interférences est une facette du contrôle inhibiteur (Diamond, 2013), ce qui suppose que ce dernier serait impliqué dans le transfert d'apprentissage (Clerc, Miller, & Cosnefroy, 2014), y compris le transfert numérique.

L'inhibition apparaît tôt dans la petite enfance et se développe progressivement chez l'enfant (Best & Miller, 2009; Diamond, 1990). Ceci pourrait partiellement rendre compte de la difficulté des enfants à effectuer le transfert. L'étude de Thibaut, French et Vezneva (2010) portant sur l'effet des interférences dans des tâches d'analogies perceptives (A : B :: C : ?) révèle par exemple que des enfants de 6 ans ne résistent pas aux distracteurs perceptifs, choisissant directement la première correspondance entre les éléments qu'ils remarquent. En revanche, des enfants de 8 ans résistent mieux aux distracteurs, en analysant tous les stimuli afin de choisir le plus pertinent. De tels résultats montrent une variabilité du contrôle inhibiteur à différents âges, qui pourrait expliquer la difficulté des jeunes enfants à contrôler les interférences de différents niveaux, conformément au modèle de Diamond (2013). Enfin, comme mentionné ci-dessus, dans le cadre du transfert numérique, les interférences pourraient naître des dis-similarités entre les tâches, entre leurs supports de présentation, voire entre leurs interfaces graphiques de présentation.

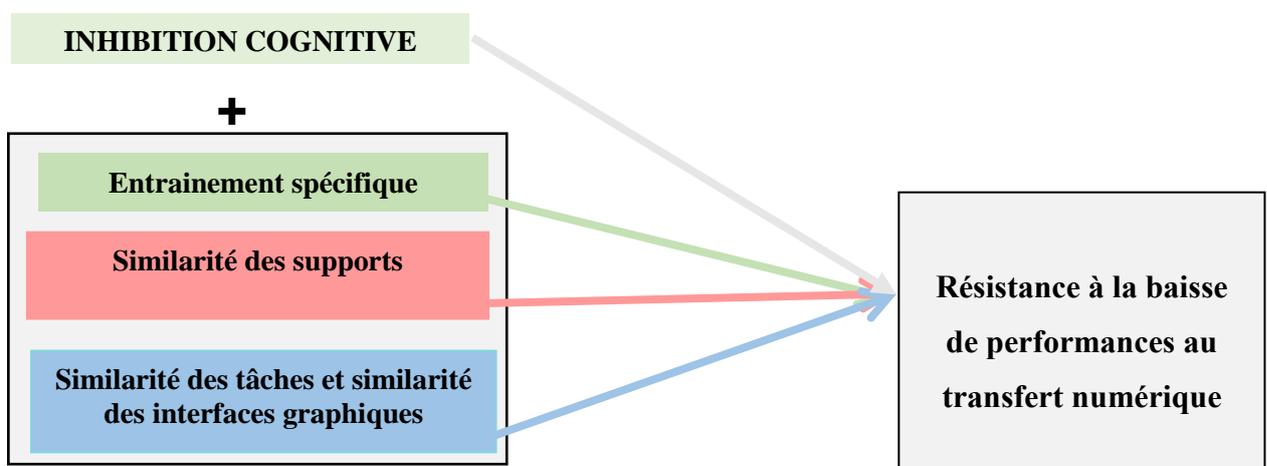
À la lumière de toutes ces données, il nous est apparu souhaitable d'étudier le transfert d'apprentissage chez l'enfant, avec des tâches de résolution de problèmes, dans un cadre moderne prenant en compte les supports numériques d'apprentissage. Précisément, avec l'émergence des outils numériques, il nous semble opportun d'une part de chercher à savoir si la baisse de performances au transfert en résolution de problème s'observe également quand la tâche principale est présentée sur un support numérique, support numérique de plus en plus présent sur le plan scolaire (Hoareau et al., 2020). D'autre part, il nous semble nécessaire

d'identifier les facteurs explicatifs de cette baisse, afin de pouvoir y remédier dans le but d'augmenter la qualité des transferts d'apprentissage chez l'enfant. Ainsi, en s'inscrivant dans le domaine de la psychologie cognitive sous une approche développementale et éducative, notre travail a un double objectif. D'abord, il a pour ambition d'opérationnaliser la notion de contexte d'apprentissage à l'aide de supports numériques, afin de tester le modèle de Klahr et Chen (2011) ainsi que l'effet d'un entraînement spécifique sur la baisse de performances au transfert. Puis, nous voulons étudier les liens entre inhibition et baisse de performances au transfert, entre différentes versions, tangibles et numériques, de la Tour de Hanoï. A notre connaissance, aucune recherche ne s'est encore intéressée à l'effet de la similarité conjointe des tâches et de leurs contextes de présentation sur la baisse de performances au transfert, ainsi qu'au rôle de l'inhibition dans cette baisse de performances en résolution de problème chez l'enfant. Dans cette perspective, nous proposons une ébauche d'approche théorique qui guidera les études empiriques de ce travail (*cf.* Figure 1).

Cette thèse s'articule en deux parties. La première est dédiée aux bases théoriques qui nous ont permis de dégager notre problématique et d'élaborer les hypothèses opérationnelles. Le premier chapitre présente le rôle que peuvent jouer les outils numériques dans les apprentissages et le développement cognitif de l'enfant. Dans le deuxième chapitre, nous présentons le concept de transfert d'apprentissage, son évolution dans la littérature et son acception contemporaine. Nous présentons également une analyse du transfert à l'ère du numérique. Le troisième chapitre traite du rôle du contrôle inhibiteur dans les apprentissages. Il s'agit d'examiner la portée du contrôle des interférences dans la réalisation de nouvelles tâches chez l'enfant. Ce dernier chapitre débouche sur l'élaboration de notre problématique de thèse.

La deuxième partie est consacrée à notre contribution expérimentale. Elle contient quatre chapitres, les trois premiers comportant chacun une étude, et le quatrième faisant place

à la discussion générale. Dans toutes ces études, nous avons cherché à vérifier si l'inhibition joue un rôle particulier dans la résistance à la baisse de performances au transfert, dans une situation de transfert numérique entre différentes versions de la Tour de Hanoï. Nous avons également testé les effets de différents facteurs impliqués dans la baisse de performances dans le transfert numérique. Ainsi, la première étude a pour objectif de tester l'hypothèse selon laquelle un entraînement, qui faciliterait l'adaptation à la tâche de transfert, pourrait prémunir un enfant de la baisse de performances au transfert. L'objectif de la deuxième étude est de tester l'hypothèse selon laquelle, dans le transfert numérique, la similarité conjointe des tâches et des supports de présentation (e.g., numérique/numérique ; tangible/tangible ; numérique/tangible ; tangible/numérique) permet à l'enfant de résister à la baisse de performances au transfert. La troisième étude cherche à tester l'hypothèse selon laquelle la similarité conjointe des tâches et des contextes numériques (interfaces graphiques de présentation des tâches numériques) peut amoindrir voire éviter la baisse de performances au transfert numérique chez l'enfant, ce qui revient à tester la validité du modèle de Klahr et Chen (2011). Pour terminer, le dernier chapitre de cette deuxième partie servira de base à la discussion de nos trois études. Il nous permettra de souligner les limites de ce travail, de dégager les perspectives pour des futures recherches ainsi que les implications dans l'évaluation des apprentissages de l'enfant à l'école.



**Figure 1.** Approche hypothétique des facteurs pouvant permettre de résister à la baisse de performances au transfert numérique

# **ASPECTS THÉORIQUES**

---

## CHAPITRE 1 : LES SUPPORTS NUMERIQUES COMME OUTILS D'APPRENTISSAGE

---

Dans ce chapitre, on se propose d'analyser le rôle que peuvent jouer les outils numériques dans les apprentissages et le développement cognitif de l'enfant. Dans cette perspective, nous nous intéresserons aux critères ergonomiques de la conception des tablettes numériques, des effets de celles-ci sur l'apprentissage.

### 1.1. Généralités

Le 21<sup>ème</sup> siècle est marqué par la révolution numérique. Les entreprises, les services publics et les ménages sont tous remplis d'appareils informatiques (télévision, ordinateur, tablette numérique, smartphone...). De l'ordinateur portable dans les années 90, au téléphone portable dans la première décennie du nouveau millénaire, nous sommes passés aux tablettes numériques (Johnson, 2013). L'omniprésence des appareils numériques s'adapte également aux usages qu'en font les enfants (Rideout, 2013). La nouvelle génération est dite « digitale native », c'est-à-dire composée d'enfants nés après la généralisation de l'usage des technologies de l'information et de la communication (Radesky & Christakis, 2016; Schwartz, 2014).

Les appareils numériques ont considérablement investi le quotidien de nombreux enfants, leur permettant de créer un univers personnel adapté à leurs besoins ludiques et/ou d'apprentissage. Les multiples fonctions des appareils numériques donnent aux enfants la possibilité de s'occuper lorsqu'ils ne sont pas à l'école, apparaissant dès lors comme un facteur à prendre en compte pour l'éducation des enfants (Rideout et al., 2010). Les enfants peuvent, semble-t-il, apprendre de ces outils. Aux États-Unis par exemple, près de 44% des parents pensent que les appareils numériques ont une dimension éducative pour leurs enfants de 2 à 10 ans (Rideout, 2014). De plus, le contact permanent des enfants avec les appareils numériques aujourd'hui pose la question de l'impact des outils numériques sur l'apprentissage et le développement des enfants. En effet, s'il n'est plus possible de rompre le contact des enfants

avec le numérique, il est néanmoins nécessaire de réguler son usage. Il ne s'agit plus, pour les parents, de contrôler l'utilisation qu'en font les enfants, mais d'étudier les méthodes capables de stimuler efficacement leurs apprentissages à partir du numérique. Pour Mayer (2008), les chercheurs ne doivent plus se contenter de chercher à comprendre comment un individu apprend, car un défi commun à la psychologie et à l'éducation consiste à trouver des moyens pour aider les élèves à apprendre. Il faut donc favoriser les apprentissages et pas seulement chercher à les comprendre, à travers des manipulations de l'environnement. Pour cela, il est nécessaire de s'intéresser à la manière de présenter les contenus d'apprentissage de façon à amorcer un traitement cognitif approprié pendant l'apprentissage (Mayer, 2008).

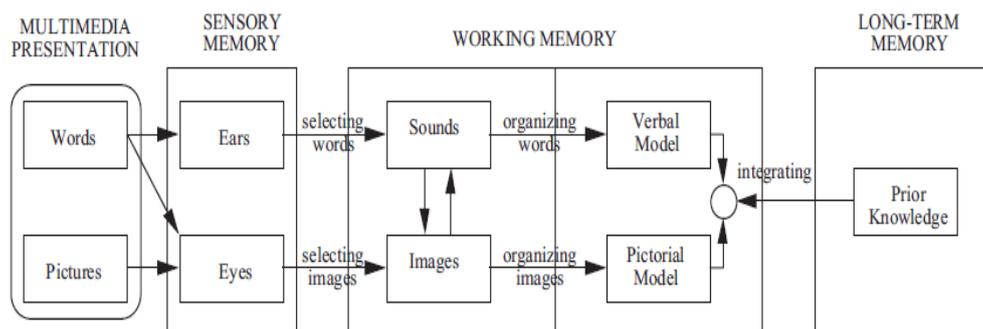
Ainsi, certains chercheurs suggèrent d'analyser les théories de l'apprentissage pour comprendre comment elles peuvent tenir compte des contextes d'apprentissage sur supports numériques (Hirsh-Pasek et al., 2015; Legros, Pembroke, & Talbi, 2001; Mayer, 2005; Zosh, Lytle, Golinkoff, & Hirsh-Pasek, 2017). Avant tout, nous devons nous départir de l'approche behavioriste de l'apprentissage, qui s'intéresse exclusivement au comportement produit en réponse à un stimulus et met de côté le système cognitif qui a permis la production de ce comportement. Depuis les travaux de Piaget (1967), nous savons que l'individu construit ses connaissances au contact de son environnement. En effet, un apprentissage est une modification dans les connaissances de l'apprenant, provoquée par l'expérience. L'apprentissage comporte trois étapes. D'abord, l'apprenant doit extraire du stimulus les informations pertinentes à apprendre. Ensuite, il doit organiser les informations sélectionnées en une représentation mentale cohérente. Enfin, il doit intégrer ces informations c'est-à-dire, les mettre en relation avec les connaissances déjà présentes en mémoire à long terme (Mayer, 2008). Ainsi, le système cognitif de l'individu se trouve au cœur de l'apprentissage.

Les modèles qui s'inscrivent dans l'approche cognitive de l'apprentissage confèrent un rôle capital à l'organisation des connaissances en mémoire, et au rôle de ces dernières dans le

traitement des informations lors de la réalisation de différentes tâches (Legros et al., 2001, Sweller, van Merriënboer, & Paas, 2019). Toute tâche s'effectuant à l'aide d'un outil, celui-ci peut jouer un rôle dans l'apprentissage et l'acquisition d'une connaissance. Dans cette perspective, les théories de l'apprentissage multimédia soutiennent que les outils numériques sont un bon moyen pour favoriser l'apprentissage. En effet, pour Mayer (2005), les théories cognitives de l'apprentissage reposent sur trois principes. Premièrement, le système de traitement de l'information implique deux canaux de traitements : l'un est dédié au traitement visuel et pictural, l'autre au traitement auditif et verbal. Deuxièmement, les capacités de traitement de chaque canal sont limitées, du fait des limites de la mémoire de travail. Troisièmement, l'apprentissage est actif, dans la mesure où il implique la mise en œuvre coordonnée de différents processus cognitifs pendant l'apprentissage. Ces trois principes forment le soubassement de la théorie cognitive de l'apprentissage multimédia.

## **1.2. La Théorie cognitive de l'apprentissage multimédia de Mayer**

Aujourd'hui, nous observons une prolifération des logiciels utilisant plusieurs formes d'images et de graphiques. L'idée générale qui sous-tend les théories de l'apprentissage multimédia est que l'association mot/image permet un apprentissage approfondi. La théorie cognitive de l'apprentissage multimédia (*Cognitive Theory of Multimedia Learning*, CTML, Mayer, 2005, 2008) suppose que les individus apprendraient mieux lorsque l'appareil numérique associe mots (à l'oral ou à l'écrit) et images (sous formes de graphique, d'images statiques, d'animations...) dans la même présentation (*cf.* Figure 2). Ceci est directement inspiré des travaux de psychologie cognitive sur le modèle de mémoire de travail de Baddeley d'une part, et sur la supériorité du double codage sur le simple codage d'autre part (*cf.* encart 1).



**Figure 2.** La théorie cognitive de l'apprentissage multimédia (CTLM) de Mayer (2005, 2008)

Dans la première colonne, on présente à l'apprenant des mots et des images sur un support multimédia. Il peut s'agir d'une leçon de manuel, d'une présentation en ligne, d'un jeu interactif ou même d'une présentation de type « PowerPoint ». Dans la deuxième colonne se trouve la mémoire sensorielle. Les mots prononcés sont perçus auditivement et brièvement maintenus dans la mémoire échoïque (Darwin, Turvey, & Crowder, 1972), tandis que les images et mots écrits sont perçus visuellement et brièvement maintenus dans la mémoire iconique (Sperling, 1960). La troisième colonne représente la mémoire de travail, au sein de laquelle l'apprenant sélectionne certains sons pour les organiser en un modèle verbal et certaines images pour les organiser en un modèle pictural. Ces deux modèles sont ensuite fusionnés, en intégrant également des éléments issus de la mémoire à long terme, à la manière du buffer épisodique décrit par Baddeley (2000). La nouvelle représentation issue de cette fusion (le nouvel « épisode » au sens de Baddeley) constitue alors une nouvelle connaissance qui peut être stockée en mémoire à long terme.

**Encart 1.** Description du déroulement de l'apprentissage dans le cadre de la CTML de Mayer (2008).

La CTML s'appuie sur trois postulats. Le premier distingue canal sensoriel visuel et canal sensoriel auditif. Le canal sensoriel visuel est dédié au traitement de tout matériel présenté visuellement (image, animation, texte sur écran...), l'information étant recueillie par la modalité sensorielle visuelle (yeux). Le canal sensoriel auditif est l'espace réservé aux traitements des stimuli verbaux (une narration, une animation musicale...) avec pour modalité sensorielle l'audition. Ainsi, selon la nature du stimulus, les mémoires sensorielles visuelle et auditive permettent de garder temporairement les stimuli sous leur forme originale. Ceci pour que l'individu sélectionne les informations pertinentes délivrées par le stimulus, la capacité de traitement de l'individu étant limitée.

Ensuite, le deuxième postulat soutient que les humains sont limités dans le nombre d'informations traitées dans le canal de la mémoire de travail (visuelle et auditive). À partir d'un canal, l'individu sélectionne dans le matériel présenté les informations qui favorisent la compréhension, et par là, l'apprentissage. Dans ce cas, l'information retenue ne reflète qu'une partie du matériel présenté. C'est par exemple ce qui se passe lorsque nous regardons un film : on ne retient pas toutes les séquences du film. La limitation de la capacité de traitement fait d'ailleurs consensus dans la littérature avec notamment les travaux sur la mémoire de travail (Baddeley, 1986; Miller, 1956), ou sur la théorie de la charge cognitive, c'est-à-dire la quantité de ressources cognitives nécessaires au traitement d'une information (Sweller, 1988, 1994 ; Tricot, 1998). Dans cette perspective, le multimédia est favorable à l'apprentissage dans la mesure où une information peut être présentée sous deux modes de représentation (e.g., image et verbale) simultanés en mémoire de travail, ce qui renforce l'efficacité des traitements cognitifs opérés par l'individu. En effet, la limitation des capacités de traitement nous contraint à décider quelles informations nous choisissons de stocker et traiter en mémoire de travail. Le but est d'établir des connexions entre les informations sélectionnées et les connaissances déjà emmagasinées, afin d'éviter un coût cognitif élevé (Mayer, 2005).

Pour finir, le troisième postulat stipule que l'être humain s'engage activement dans le traitement cognitif des stimuli pour construire une représentation cohérente de ses expériences. Cet apprentissage actif se produit quand les processus cognitifs opèrent des traitements sur un matériel entrant, afin de permettre à l'individu de donner du sens à ce matériel et donc d'en construire une représentation cohérente (Mayer, 2008). L'apprentissage actif est donc un processus de construction d'un modèle de représentation, c'est-à-dire la connexion des informations issues des canaux de traitement visuel et auditif sous forme de nouvelle connaissance.

Inclure les structures des connaissances dans la CTML a deux implications importantes. D'abord, présenter le matériel sur un support numérique lui assure une structure cohérente. Ensuite, l'instruction pédagogique associée au matériel est à même de renforcer la compréhension (Mayer, 2005). Pour l'auteur, si par exemple on présente le matériel en commençant par des éléments isolés (tel qu'un volcan sans sa lave), l'effort de construction du modèle de l'apprenant sera vain. De même, si l'instruction pédagogique manque d'orientation sur la structuration du matériel, à l'exemple d'une simple définition du volcan sans dire comment ses composantes s'agencent, la construction du modèle de représentation va échouer. Le matériel et l'instruction doivent donc être présentés de façon dynamique, de telle sorte que l'apprenant donne du sens à ce qu'il apprend. La tâche doit donc être présentée sur l'interface graphique, c'est-à-dire respecter une disposition des éléments graphiques sur un écran qui puisse faciliter l'interaction avec l'utilisateur, de façon à ne pas engendrer un coût cognitif élevé. Dans cette perspective, pour qu'un apprentissage multimédia soit bénéfique, tous les éléments visibles sur l'interface numérique doivent servir à l'apprentissage, à la compréhension et à l'acquisition de la connaissance visée. Mayer (2008) a dégagé 5 principes de présentation du matériel sur un outil numérique :

*Le principe de cohérence.* Celui-ci consiste à supprimer les détails attrayants (*seductive details*), c'est-à-dire un ensemble d'images intéressantes mais non pertinentes pour la compréhension de la tâche ou le stimulus présenté à l'écran (Wang, Sundararajan, Adesope, & Ardasheva, 2016). Il s'agit précisément de tous les éléments de décor qui environnent la tâche présentée à l'écran. Ces éléments entravent le traitement du stimulus, de la tâche et engendrent un coût cognitif élevé. En effet, l'insertion d'un matériel inutile à la compréhension de la tâche peut conduire l'apprenant à s'engager dans un traitement supplémentaire, non pertinent pour l'apprentissage en cours.

*Le principe de signalisation.* Il intervient lorsqu'il n'est pas possible de supprimer les détails attrayants. En effet, parce que les détails attrayants rejaillissent sur les émotions des apprenants, ils peuvent avoir un effet positif sur leur motivation (Park, Flowerday, & Brünken, 2015). Suivant cette logique, ils peuvent être combinés avec les détails pertinents. Néanmoins, pour éviter que ces détails attrayants distraient l'apprenant, il faut mettre les éléments pertinents en évidence : c'est le principe de signalisation. Sa fonction est d'attirer l'attention de l'apprenant sur des éléments pertinents du contenu, en surlignant par exemple des mots ou concepts présentés à l'écrit. Ceci permettrait de réduire au minimum le traitement des détails attrayants et ainsi éviter des traitements inutiles.

*Le principe de contigüité spatiale.* Il consiste à placer, dans une même zone spatiale ou à proximité, plusieurs représentations d'une même information sous forme multimodale, afin de faciliter les connexions entre ces différentes représentations de l'information. Chaque phrase d'un texte explicatif d'un schéma est par exemple placée dans la partie du schéma qu'elle décrit.

*Le principe de contigüité temporelle.* Il consiste en la présentation d'éléments multimodaux d'une même information dans le même espace temporel. C'est le cas avec les comptines pour enfants, dans lesquelles la chanson est simultanément visualisée avec un personnage qui illustre les actions décrites oralement dans la comptine.

*Le principe de redondance.* Ajouter un texte à l'écran en plus d'une animation permet aux apprenants d'avoir le choix du type de traitement (visuel ou auditif), mais cela risque par là-même d'entraîner un traitement supplémentaire. Exposer une même information plusieurs fois, sous différentes formes sur une seule interface (e.g., une animation accompagnée d'une narration, puis d'un texte encore), rend son contenu redondant. Si un traitement supplémentaire est opéré, il consomme inutilement les ressources cognitives et diminue d'autant la quantité disponible et nécessaire pour un apprentissage approfondi. Dans ce sens, le principe de redondance conduit à réduire les modalités de présentation d'une même information.

Le respect de ces cinq principes est nécessaire pour assurer l'efficacité de l'apprentissage multimédia. Ils permettent tour à tour de supprimer les éléments superflus contenus sur l'interface numérique, d'attirer l'attention de l'apprenant sur les éléments pertinents, de présenter le matériel sous différentes formes de façon juxtaposée et simultanément, et d'éviter la redondance d'une information. Dans l'ensemble, cela évite aux apprenants de traiter un matériel inutile, qui pourrait entraver le processus d'apprentissage et par là-même la construction du modèle de représentation de la connaissance à acquérir. Il faut toutefois noter que ces principes sont à respecter dans le but de faire baisser la charge cognitive. Pour cela, ils ne sont applicables qu'à certaines conditions, 1) lorsque l'ajout d'un matériel entraîne une dissociation de l'attention, et il faut alors soit supprimer ce matériel, soit attirer l'attention de l'apprenant sur le matériel pertinent (principes de cohérence et de signalisation), 2) lorsque le matériel est difficile à traiter et doit par conséquent être présenté selon deux modalités sensorielles de façon simultanée (principes de contiguïté spatiale et temporelle), 3) selon le niveau d'expertise de l'apprenant, pour qui, lorsqu'il est expert, l'ajout d'un matériel pour expliquer la même chose qu'un autre matériel devient redondant (principe de redondance) (voir Tricot, 1998, pour une revue)

Ainsi, le dispositif technologique peut être conceptualisé pour assister les apprenants dans leur construction du modèle de représentation. Néanmoins, l'apprentissage actif ne se limite pas à une présentation structurée du matériel et à l'instruction qui l'accompagne, l'apprenant doit pouvoir aussi établir des connexions entre les informations verbales et visuelles. Mayer (2005) et Mayer et Moreno (1988) ont dégagé trois types de connexions pour que l'apprentissage actif sur le numérique soit effectif. L'apprenant doit établir une connexion entre les informations verbales qu'il a sélectionnées, présentées à l'oral ou à l'écrit, et la représentation qu'il s'en fait, pour produire un modèle verbal applicable également aux images. Puis, il doit établir une connexion entre les informations visuelles présentées sur l'écran et qu'il

a sélectionnées, et la représentation qu'il s'en fait, pour créer une base d'images. Pour terminer, l'apprenant doit procéder à l'intégration des modèles verbal et imagé, qui se produit lorsque l'apprenant établit des connexions entre les représentations correspondantes à l'apprentissage, qui sont issues de ces deux modèles, pour en dégager une nouvelle représentation. La production itérative de ces différentes connexions génère une charge cognitive dont il convient de décliner et d'analyser succinctement les différents types (Deleeuw & Mayer, 2008).

*La charge cognitive intrinsèque* : elle consiste en la quantité de ressources minimales nécessaires pour comprendre la tâche. Elle ne peut être réduite sous peine de rendre le traitement défectueux (Amadiou & Tricot, 2006). Dans cette perspective, elle est évaluée par la quantité d'éléments à traiter simultanément et par les niveaux d'interactivité entre eux (Chanquoy, Tricot, & Sweller, 2007; Sweller, 1994). Lorsque l'interactivité entre les éléments est élevée la charge cognitive intrinsèque est forte, et inversement lorsque les éléments n'interagissent pas. Considérons une liste de verbes irréguliers anglais à apprendre, chaque verbe peut être appris indépendamment des autres. L'apprentissage de cette liste de verbes génère une charge cognitive intrinsèque faible, car les verbes n'interagissent pas. Considérons maintenant une tâche de puzzle dans laquelle chaque élément est placé en fonction des autres éléments, dans la mesure où les pièces sont emboîtées les unes aux autres. Du fait que les éléments interagissent, il faut les traiter simultanément pour pouvoir comprendre les relations entre eux et réaliser la tâche, ce qui génère une forte charge cognitive intrinsèque. La charge cognitive intrinsèque est ainsi caractérisée par le nombre d'éléments de la tâche qui interagissent (Sweller, 2005). Si la charge cognitive intrinsèque est irréductible, il est toutefois possible de rendre le traitement simultané des éléments plus efficace en ajoutant des éléments qui attirent l'attention de l'apprenant sur ce qui est pertinent pour la compréhension et la réalisation de la tâche.

*La charge cognitive essentielle* : elle dérive du traitement cognitif profond effectué sur la tâche, comme organiser mentalement le matériel et le relier aux connaissances antérieures.

En ce sens, elle participe à l'enrichissement des schémas ou à leur automatisation (Chanquoy et al., 2007 ; Sweller, 2005). Elle est observée dans le principe de signalisation décrit plus haut, qui consiste à ajouter une information pour attirer l'attention de l'apprenant ou une figure qui illustre la description d'un phénomène, pour une meilleure compréhension de celui-ci. L'ajout de ces éléments augmente en effet la charge cognitive, cette augmentation étant un mal nécessaire car elle contribue à la construction du schéma ou à son automatisation. Du fait que la charge cognitive essentielle résulte d'un apprentissage approfondi, elle est à prioriser dans la tâche, et pour cela il faut autant que possible éviter des traitements inutiles.

*La charge cognitive extrinsèque ou inutile* : elle provient du traitement d'une information non pertinente pour la tâche à réaliser. Elle peut être causée par une présentation erronée du matériel, contenant des informations inutiles qui conduisent l'apprenant à s'engager dans des traitements supplémentaires (Chanquoy et al., 2007). Dans le cadre de l'apprentissage sur outil numérique, si les détails attrayants rendent la tâche plus séduisante, ils peuvent néanmoins compromettre son traitement, car ils sont responsables d'une consommation inutile d'une partie des ressources cognitives. En effet, la charge cognitive intrinsèque étant irréductible, la quantité de ressources qui lui est consacrée est constante : le reste des ressources est alors réparti entre la charge cognitive essentielle qui permet la construction de schémas approfondis de la tâche, et la charge cognitive extrinsèque. Afin de consacrer davantage de ressources à la charge cognitive essentielle et par là, permettre la construction des schémas, il faut donc réduire la charge cognitive extrinsèque (Sweller, 2005). C'est ce qui est observé dans le principe de cohérence évoqué plus haut.

Dans une récente revue systématique de la littérature, Mutlu-Bayraktara, Cosgunb et Altanc (2019) ont examiné 94 articles publiés de 2015 à 2019 sur l'effet des détails attrayants sur les types de charge cognitive. 30% des études ont montré que les détails attrayants occasionnent une charge cognitive extrinsèque contre 15% d'études qui ont montré un effet sur

la charge cognitive intrinsèque. La charge cognitive extrinsèque est le type de charge observé le plus souvent dans l'apprentissage multimédia. Un montant élevé de charge cognitive extrinsèque limite la mobilisation de ressources consacrées à la charge cognitive essentielle, alors qu'une réduction de la charge extrinsèque libère les ressources pour la charge cognitive essentielle (Amadiou & Tricot, 2006). Ceci pourrait expliquer pourquoi un apprentissage multimédia qui ne respecte pas les principes de Mayer (2008) détériore l'apprentissage plutôt que de l'améliorer.

En résumé, la charge cognitive essentielle, la charge cognitive intrinsèque et la charge cognitive extrinsèque sont, d'une part, asymétriques dans le sens où seule la charge cognitive intrinsèque est irréductible et nécessite une quantité de ressources constante, le reste des ressources étant réparties entre les deux autres. D'autre part, elles se cumulent pour constituer la charge cognitive totale générée par une tâche. Si cette charge totale dépasse la quantité de ressources cognitives disponibles, le système cognitif échouera à traiter l'information efficacement (Chanquoy et al., 2007).

Pour résumer, la CTML se propose de faire une description articulée des processus d'apprentissage engagés par l'individu au contact des supports numériques. Elle prescrit également une « science de l'instruction » (Mayer, 2008), permettant de fournir aux professionnels de l'éducation des méthodes de présentation du matériel multimédia plus adaptées. Ceci doit permettre de limiter la charge cognitive engendrée par l'apprentissage au contact du support numérique. Une telle entreprise exige un dispositif technologique bien conçu, avec des spécificités d'usage clairement circonscrites. C'est le cas des tablettes numériques tactiles.

### **1.3. La tablette numérique tactile : un outil avec des spécificités**

Les outils numériques deviennent de plus en plus sophistiqués. Il est par exemple maintenant possible d'accéder à l'information depuis n'importe quel endroit et réaliser des

activités de plusieurs natures (ranger des documents, jouer, travailler sur un projet). Ceci est devenu possible parce que les outils numériques sont devenus si fins et si légers qu'on peut les emporter partout où nous allons, et leurs utilisateurs sont transformés en « nomades numériques » (Baccino & Draï-Zerbib, 2012). Parmi les outils sophistiqués, la tablette numérique comprend plusieurs spécificités. Son utilisation n'exige pas d'accessoires (souris, clavier) mais nécessite l'usage de la main et donc un contact direct avec l'écran, renfermant par là des caractéristiques haptiques. Elle nécessite des postures moins contraignantes que les ordinateurs par exemple, et permet maniabilité et intuitivité : elle permet en effet un pointage direct sur une icône ou sur un lien avec le doigt, et recouvre également un autre usage avec plusieurs doigts (agrandissement/réduction d'images). Straker et al. (2008) ont montré que des enfants de 5-6 ans peuvent présenter des Troubles Musculo-Squelettiques (TMS) avec une symétrie entre le cou et la tête, lors d'une activité de coloriage sur tablette, ordinateur et papier. Bien que la posture ait été meilleure avec l'ordinateur, les auteurs soulignent que grâce à la variabilité des postures qu'offre la tablette, l'activité sur celle-ci permet de compenser les TMS. De plus, la tablette offre une disposition des boutons organisée en privilégiant certaines zones. Les boutons les plus utilisés sont placés dans une zone accessible (*easy zone*), alors que dans d'autres zones moins accessibles (*reach zone*) on positionne des boutons moins utilisés. Cette disposition permet d'éviter une utilisation par inadvertance et favorise un usage intuitif (Baccino & Draï-Zerbib, 2012).

L'intuitivité des tablettes numériques peut porter sur des aspects perceptifs (organisation perceptive des informations et affordance), ou sur des aspects cognitifs (familiarité des situations rencontrées) (Baccino & Draï-Zerbib, 2012). La première facette de l'intuitivité perceptive concerne l'organisation de la scène visuelle présentée sur l'interface. Les théoriciens gestaltistes soutenaient que la vision humaine opère par catégorisation (regroupement et distinction) pour traiter les différents éléments de la scène visuelle (Wertheimer, 1923, cité par

Baccino & Draï-Zerbib, 2012). Le principe de catégorisation permet de regrouper sur l'écran les blocs informationnels de même nature (les animaux ensemble, les fruits avec les fruits, etc.) ou ayant les mêmes traits (taille, couleur, forme), et entraîne un meilleur repérage de l'information. En revanche, lorsque les éléments sont aléatoirement disposés sur l'interface, les utilisateurs doivent eux-mêmes organiser les informations, ce qui consomme une part des ressources cognitives nécessaires pour l'activité, et occasionne une charge cognitive extrinsèque.

Pour prévenir le risque d'une charge cognitive extrinsèque, l'ergonomie des interfaces s'intéresse à une seconde facette de l'intuitivité perceptive : l'affordance. Il s'agit d'une propriété qui émerge des interactions de l'Homme avec son environnement physique, lui permettant de s'adapter par le rapport perception-action. L'objet que nous percevons doit renfermer l'information qui nous renseigne sur sa fonction, et donc sur l'action que nous devons effectuer (e.g., marmite/cuisson) (Luyat & Regia-Corte, 2009). En ergonomie des interfaces, c'est-à-dire quand on s'intéresse à la disposition des icônes, pictogrammes et images sur un écran, l'affordance est utilisée pour qualifier la facilité avec laquelle certaines actions sont intuitivement découvrables (Baccino & Draï-Zerbib, 2012). Cette notion doit être prise en compte lors de la conception des tablettes numériques, car l'affordance peut à la fois permettre une personnalisation et un accès à tous les utilisateurs, mais aussi l'intégration de multiples fonctionnalités (Major, Haßler, & Hennessy, 2017). Toutefois, si l'on doit intégrer des fonctionnalités dans la tablette numérique, il est également important que celles-ci soient familières aux utilisateurs, c'est-à-dire qu'elles permettent une intuitivité cognitive. Dans ce cas, l'accent n'est plus mis sur les aspects perceptifs des éléments des interfaces, mais sur la connaissance d'usage qu'a l'utilisateur de ces éléments. Celle-ci est constituée de la mémoire des situations (contextes de vie et d'actions) et des procédures (actions, routines acquises par l'expérience) qui sont sollicitées (Baccino & Draï-Zerbib, 2012). Par exemple, la disposition

des livres dans les rayonnages des bibliothèques peut servir de référence aux concepteurs pour disposer différentes applications sur une interface (cf. Figure 3), ce qui rappelle à l'utilisateur une situation habituelle.



**Figure 3.** Un critère de l'intuitivité cognitive : la familiarité, tirée de Baccino et Draï-Zerbib (2012).

Ainsi, pour concevoir une interface, il est essentiel de connaître et comprendre les habitudes des utilisateurs, ainsi que leurs réactions au contact des stimuli environnementaux. Dans cette perspective, si concevoir une interface graphique nécessite une analyse du rapport utilisateur/environnement (e.g., physique et social), il semble important également d'adapter l'environnement de l'utilisateur pour le retranscrire sur l'interface. Serait-il exagéré de dire que les interfaces des tablettes constituent en elles-mêmes des contextes d'apprentissage, et en l'occurrence des contextes numériques d'apprentissage ?

La littérature sur ces questions est peu documentée et les rares études qui s'y intéressent ne fournissent pas de réponses claires. Néanmoins, il est reconnu à la tablette numérique des propriétés d'affordance (Baccino & Draï-Zerbib, 2012; Major et al., 2017). Lorsqu'elles sont prises en compte dans la disposition des éléments sur les interfaces des tablettes (les écrans), les propriétés d'affordance peuvent permettre de concevoir des environnements d'apprentissages personnalisés (e.g., ajustement de couleur, taille du texte), voire des expériences atypiques différentes de celles vécues en classe (e.g., modalités visuelles et

tactiles/kinesthésiques présentes dans un même appareil) (Major et al., 2017). Néanmoins, on peut se demander si les spécificités de la tablette numérique constituent une condition suffisante pour favoriser l'apprentissage. Certains chercheurs soutiennent en particulier que pour apprendre sur une tablette numérique, il faut que l'apprenant perçoive une utilité et une facilité d'usage de celle-ci (Mulet, Van de Leemput, & Amadiou, 2019), ce qui permet une acceptabilité de l'outil (Amadiou, Mulet, Van der Linden, Lombard, & Van de Leemput, 2019).

Dans leur revue de la littérature, portant sur les facteurs influençant la perception des tablettes numériques chez les apprenants, réalisée à partir de 41 études menées entre 2000 et 2018, Mulet et al. (2019) relèvent trois facteurs majeurs. Le premier concerne l'espérance de performances, c'est-à-dire l'utilité perçue pour leurs tâches scolaires. 22 études rapportent que les élèves perçoivent plusieurs avantages à utiliser la tablette pour leurs tâches scolaires. Ils pensent que les tablettes numériques sont utiles, les enrichissent, rendent l'apprentissage plus agréable et le facilitent. Néanmoins, 12 rapportent des effets négatifs de la tablette numérique pour la réalisation des tâches scolaires, soulignant deux grandes limites. D'une part, les tablettes numériques peuvent distraire les apprenants lors de la réalisation des tâches. D'autre part, il y a un manque de contenus et de tâches adaptés à la tablette numérique, dans la mesure où les activités d'apprentissage doivent être minutieusement planifiées et conçues par les enseignants, ceci pour éviter que l'apprenant soit distrait par un quelconque élément ou action non essentiel à la tâche.

Le deuxième facteur concerne l'effort perçu, c'est-à-dire la perception que l'apprenant a de l'effort que nécessite l'utilisation d'une tablette numérique. Cet effort perçu ne doit pas être trop élevé, donnant ainsi à la personne une impression de facilité d'usage. Brangier et Bastien (2010) soutiennent qu'un outil numérique est facile à utiliser, lorsqu'il est d'une part accessible. En effet, l'accessibilité permet à tout individu de faire face aux inégalités dans l'usage du numérique. Elle consiste en « l'intégration de toutes les personnes, y compris les

personnes à besoins spécifiques, qui, par leurs âges, leurs expériences, leurs handicaps, ne se sont pas familiarisées avec les nouvelles technologies » (Brangier & Bastien, 2010, p. 314). D'autre part l'utilisation de l'outil numérique est jugée facile, lorsqu'il est adapté aux tâches de l'apprenant. Les interfaces numériques doivent par conséquent s'adapter au fonctionnement cognitif, aux capacités motrices, et aux capacités perceptives de l'utilisateur : c'est la composante d'utilisabilité de l'outil numérique (Brangier & Barcenilla, 2003). Dans la revue de Mulet et al. (2019), 15 études rapportent que pour les apprenants, les tablettes numériques sont faciles à utiliser. Ecrire sur tablette est jugé moins contraignant, car celle-ci facilite le partage et la gestion des documents, ainsi que l'accès aux ressources d'apprentissage. Néanmoins, 22 études rapportent des effets négatifs de l'utilisation de la tablette numérique, celle-ci provoquant un inconfort physique dû à une fatigue visuelle et un changement de postures continuel.

Le troisième facteur est l'attitude de l'apprenant envers la tablette numérique. Selon la nature de l'expérience de l'apprenant avec la tablette, sa perception de celle-ci change. Il peut accepter ou pas d'utiliser la tablette. L'expérience d'utilisation d'une tablette est en rapport direct avec le plaisir perçu. En effet, l'interaction d'un utilisateur avec une interface graphique le conduit à une interprétation émotionnelle de l'expérience qu'il vit (Brangier & Bastien, 2010). L'expérience avec la tablette a un impact sur l'attitude de l'apprenant (Mulet et al., 2019) et celle-ci est un déterminant de l'acceptabilité de la tablette (Amadiou et al, 2019). En somme, c'est l'expérience de l'apprenant avec la tablette qui détermine sa perception générale et conduit à son acceptabilité. L'expérience de l'utilisateur concerne l'espérance (utilité) perçue, l'effort (accessibilité, utilisabilité) perçus, et l'attitude (plaisir perçu : émotionnalité ; influence sociale : influençabilité) (*cf.* Figure 4).

Les apprenants ont globalement une perception positive de la tablette, et dans la plupart des cas l'acceptent. Néanmoins, cette perception est modérée par la nature des tâches et la

compatibilité de celles-ci avec les fonctionnalités de la tablette. D'une part, la perception d'une tablette numérique pour l'apprentissage dépend de la nature des tâches à effectuer, car elle n'est pas toujours utile et facile à utiliser pour toutes les tâches ; d'autre part, la variabilité des situations d'apprentissage pourrait expliquer pourquoi certains résultats sont incohérents et contrastés (Amadiou et al., 2019). Ainsi, on peut se demander dans quelle mesure une tâche est compatible avec la présentation sur tablette numérique.



**Figure 4.** Les domaines de l'expérience utilisateur, tirée de Brangier et Bastien (2010).

### 1.3.1. Conception ergonomique des apprentissages numériques : le cas des applications

Alors qu'on assiste à une prolifération des applications numériques d'aide à l'apprentissage, les enfants se retrouvent au cœur d'une vaste expérience, non planifiée et non contrôlée, d'usage de technologies (Hirsh-Pasek et al., 2015). En effet, le développement des applications numériques est rarement contrôlé, ou même seulement dirigé, par des spécialistes

de l'éducation. Or, la plupart des concepteurs d'applications soutiennent qu'une application est censée aider l'enfant dans son apprentissage (Mayer, 2016). Au milieu de ce boom technologique, il devient donc important de mettre de l'ordre. La conception et l'usage des applications éducatives doivent, par exemple, s'harmoniser avec les processus connus de l'apprentissage. Hirsh-Pasek et al. (2015) estiment que la conception d'une application doit s'appuyer sur quatre piliers : apprentissage actif, apprentissage significatif, interaction sociale, engagement.

### ***1.3.1.1. Apprentissage actif***

Depuis la théorie piagétienne constructiviste, il est admis que les enfants prennent une part active à leur apprentissage. Ils ne se contentent pas d'observer ce qui se passe autour d'eux, puis de copier ou d'attendre que d'autres personnes leur transmettent des connaissances. Ils sont acteurs de leur apprentissage (Lehalle, 2014; Vergnaud, 2011). En ce qui concerne les applications dédiées aux apprentissages, la conjonction d'une activité physique et d'une activité cognitive est nécessaire. En effet, l'accès à une application numérique sur tablette nécessite à minima une activité physique (mains, posture, etc.), mais également une activité cognitive impliquant les processus classiquement retrouvés dans l'apprentissage (attention, mémoire, fonctions exécutives, etc.) (Hirsh-Pasek et al., 2015).

Le terme « mind-on » est utilisé pour désigner un cerveau actif, et pour distinguer les activités physiques qui ne nécessitent pas un effort cognitif des tâches qui impliquent des opérations cognitives (Hirsh-Pasek et al., 2015). Par exemple, toucher une icône sur un écran pour avoir une information ou faire apparaître un élément ne répond pas aux critères de l'apprentissage actif tel que défini ici. En revanche, des activités telles que déterminer volontairement où on doit placer une pièce de puzzle sur l'écran, ou apprendre à additionner ou soustraire des éléments présents à l'écran, s'inscrivent dans l'apprentissage actif. Ainsi, une application numérique doit fournir un apprentissage cognitivement actif, en produisant une

réponse de la tablette visible à l'écran à la suite d'une action de l'apprenant sur l'écran (Hirsh-Pasek et al., 2015).

### *1.3.1.2. Apprentissage significatif*

Quand l'enfant apprend, il a besoin de donner du sens à la tâche, c'est-à-dire de reconnaître à celle-ci une certaine pertinence susceptible de lui apporter une connaissance nouvelle, faute de quoi il peut s'ennuyer. Il est donc important que les éléments de la tâche d'apprentissage permettent d'accorder à celle-ci une signification. Dans cette perspective, à partir des travaux en psychologie cognitive, on sait que la signification donnée à un stimulus provient de l'expérience que l'individu entretient avec ce stimulus.

Un apprentissage durable et utile est le résultat d'expériences qui nous permettent de relier nos connaissances déjà stockées en mémoire à long terme (MLT) aux informations pertinentes délivrées par la tâche (Léger, 2016). Prenons l'exemple d'un enfant qui apprend une leçon par cœur pour préparer son examen. Quelques semaines plus tard, interrogeons-le sur les éléments structurels de la leçon : la probabilité est grande que l'enfant ait oublié ce qu'il avait appris par cœur quelques semaines plus tôt, par manque d'intégration des informations délivrées par la tâche à la base sémantique pré-existante. Ce manque d'intégration ne lui permet pas d'attribuer une signification aux informations délivrées par la tâche, et donc de construire de nouvelles connaissances durables et transférables.

Pour que l'apprentissage soit significatif, la situation doit intégrer plusieurs éléments, incluant en particulier l'objectif d'apprentissage poursuivi et la pertinence subjective du matériel d'apprentissage. L'apprenant doit également pouvoir intégrer les nouvelles informations aux connaissances pré-existantes. Il doit pouvoir pour cela utiliser des stratégies cognitives d'élaboration, consistant à créer des liens entre les connaissances antérieures et les nouvelles informations (Bjorklund, Dukes, & Douglas-Brown, 2009 ; Glogger, Schwonke, Holzäpfel, Nückles, & Renkl, 2012). Ces stratégies permettront en effet aux apprenants

d'établir délibérément des liens entre le matériel à apprendre et les connaissances antérieures présentes en MLT, ce qui permet de récupérer efficacement la connaissance visée. L'activité proposée par l'application numérique doit donc prendre en compte les habitudes des enfants et l'état de leurs connaissances du monde, afin qu'ils activent lesdites connaissances et les connectent aux nouvelles informations délivrées par l'activité. Aussi, Hirsh-Pasek et al. (2015) suggèrent-ils aux concepteurs des applications de tenir compte de l'environnement familial des enfants, car celui-ci détermine en grande partie les habitudes et connaissances de ces derniers et participe ainsi à leurs apprentissages.

### ***1.3.1.3. Interaction sociale***

Le développement de l'enfant se fait au contact de son milieu social (Wallon, 1959), il apprend de ses interactions sociales (Esein & Lillard, 2020 ; Zack & Barr, 2016). Par exemple, dès 3 mois les enfants expriment déjà une préférence pour les visages par rapport aux autres stimuli (Kelly, Douarte, Meary, Bindemann, & Pascalis, 2019). Les premières interactions qu'établit l'enfant avec son milieu sont en particulier des interactions sociales, celles-ci étant très importantes pour ses apprentissages dès la période préscolaire (Hirsh-Pasek et al., 2015). Par conséquent, les applications numériques doivent trouver le moyen de fournir aux enfants des interactions sociales : une telle initiative se heurte néanmoins à la nature même des interactions sociales.

Bien que les applications numériques soient capables de permettre des interactions contingentes, c'est-à-dire la production d'une réponse de l'application après que l'enfant ait touché l'écran, orientant l'enfant vers la prochaine action à effectuer, elles ne permettent pas toujours une réelle interactivité sociale. Par exemple, la majorité des applications ne contiennent pas de fonction d'encouragement d'un enfant qui dit le mot « vache », ou qui imite le meuglement d'une vache, après avoir, sur écran tactile, vu, touché et entendu une vache qui meugle. Un tel manque de feedback peut être préjudiciable à l'apprentissage, l'enfant ne

sachant pas si son action est pertinente. Une solution consiste à concevoir des applications qui permettent à plusieurs utilisateurs de s'engager dans des interactions communes autour d'un écran (Hirsh-Pasek et al., 2015).

#### *1.3.1.4. L'apprentissage engagé*

La qualité éducative d'une application dépend en partie de sa capacité à maintenir l'engagement de l'enfant tout au long de l'activité d'apprentissage. Cela signifie que les concepteurs doivent en particulier éviter la multitude d'éléments distrayants qui peuvent potentiellement apparaître à l'écran (animation, effets sonores, etc.). Si en effet ces éléments, qui environnent la tâche présentée à l'écran, semblent attrayants pour l'enfant, ils n'améliorent pas pour autant la compréhension du contenu principal. Outre le risque d'augmenter la charge cognitive extrinsèque (Amadiou & Tricot, 2006 ; Sweller, 2005), de tels distracteurs perturbent au contraire la cohérence de l'expérience d'apprentissage et l'engagement de l'enfant dans la tâche (Hirsh-Pasek et al. 2015). Pour permettre un engagement optimal dans l'activité d'apprentissage, ces auteurs suggèrent qu'une application éducative doit comporter trois composantes. La première est l'interaction contingente. Elle consiste à fournir immédiatement une réponse à l'enfant à chaque contact avec l'écran tactile. Les enfants de 24 mois qui ont des interactions contingentes avec les écrans tactiles apprennent par exemple plus de mots que les enfants qui regardent une vidéo non interactive (Kirkorian, Choi, & Pempek, 2016). Ainsi, les interactions contingentes des enfants avec les écrans permettent de les maintenir concentrés et de poursuivre l'activité.

Deuxièmement, l'enfant a besoin d'être motivé pour être engagé dans la tâche. En effet, lorsqu'un enfant n'éprouve aucune volonté personnelle de réaliser une tâche présentée sur un écran, il est important de l'encourager lorsqu'il fournit une réponse correcte ou produit une action correcte. Une application éducative doit donc fournir à l'enfant des feedbacks, car ceux-

ci permettent de renforcer chez l'enfant les réponses positives et, partant, de l'encourager à s'améliorer. Une application avec une section de questions-réponses explicite apporte généralement des réponses différenciées (e.g., « correct » vs « incorrect »), et des messages encourageants (e.g., « bon travail », « essayez encore ») qui, lorsqu'ils sont bien structurés, peuvent motiver l'enfant à continuer l'activité (Hirsh-Pasek et al., 2015). La troisième composante de l'apprentissage engagé est le feedback. Celui-ci peut améliorer l'apprentissage sur tablette numérique. Pour cela, il convient de mener une analyse précise du rôle de cette composante dans l'apprentissage chez l'enfant.

#### *1.3.1.5. Les feedbacks*

Produire un feedback consiste à fournir à un apprenant des informations sur sa performance. Il implique un contexte d'apparition, une source, un récepteur et une fonction. Le feedback doit être considéré comme un processus et non comme une simple information reçue, car l'apprenant joue un rôle dans la recherche de l'information, ce qui suppose que la réception du feedback n'est pas passive (Bosc-Miné, 2014). Le feedback peut permettre à l'apprenant de s'améliorer dans des tâches ultérieures semblables ou plus complexes. Il conduit à re-traiter l'information et reformuler la réponse, permettant à l'apprenant de corriger ses erreurs (feedback informatif) et dans le meilleur des cas de les comprendre (feedback explicatif). Ce retour d'information occasionne donc une prise de conscience de ses erreurs, et dans certains cas une meilleure compréhension de la tâche. Dans cette perspective, les feedbacks sont impliqués dans les activités cognitives que commande une tâche (voir Bosc-Miné, 2014, pour une revue).

L'efficacité d'un feedback dépend de son orientation, et celle-ci est observable à quatre niveaux (Hattie & Timperley, 2007). Premièrement, le feedback peut porter sur une tâche ou sur la qualité de la réponse (correcte ou incorrecte) : c'est le feedback correctif. Ce type de

feedback concerne la façon dont une tâche est accomplie ou exécutée, et attire l'attention de l'apprenant sur la qualité de sa réponse, l'acquisition d'informations supplémentaires ou différentes (e.g., vous avez oublié d'ajouter une définition). Ce feedback ne concerne pas seulement l'exécution d'une tâche (connaissance du résultat), mais aussi la manière dont une tâche est exécutée (connaissance de la performance) (Wisniewski, Zierer, & Hattie, 2020). Deuxièmement, le feedback peut viser le processus utilisé pour accomplir une tâche. Ce type de feedback porte directement sur le traitement de l'information ou les processus d'apprentissage qu'exigent la compréhension ou l'exécution de la tâche (e.g., « tu gagnerais à déplacer d'abord les pièces qui reconstituent le cadre du puzzle pour insérer facilement celles du milieu »). Le feedback sur les processus sous-jacents à une tâche peut également agir comme un mécanisme de repérage et conduire à une recherche d'informations et à une utilisation des stratégies plus efficaces pour réaliser la tâche. Troisièmement, le feedback peut être axé sur le niveau d'autorégulation ainsi que sur une grande compétence en auto-évaluation ou une grande confiance pour s'engager davantage dans une tâche (e.g., « vous connaissez certainement le test statistique à appliquer pour un tel design expérimental »). Ce feedback est fourni de sorte que les apprenants soient encouragés à poursuivre la tâche, ou informés de la manière de mieux poursuivre la tâche et de la rendre plus facile. Quatrièmement, le feedback peut porter sur l'estime de soi de l'apprenant (e.g., « c'est très bien, tu es un excellent élève »). Ce feedback est souvent sans rapport avec la performance dans la tâche. Il concerne davantage les éloges, les renforcements positifs qui peuvent motiver l'apprenant sans pour autant avoir une efficacité sur la réalisation de la tâche (Hattie & Timperley, 2007).

Wisniewski et al. (2020) ont analysé 435 études dans leur méta-analyse sur l'effet du feedback sur l'apprentissage des élèves. L'impact du feedback sur les apprentissages des élèves est considérablement influencé par le contenu de l'information transmise. Le feedback est plus efficace lorsqu'il contient des informations sur la tâche. Les feedbacks de type personnel

(éloges, punition) ont de faibles effets, alors que le feedback riche en informations est le plus efficace. Ce type de feedback contient des informations sur la tâche, le processus, voire le niveau d'autorégulation. Les résultats montrent également que l'effet du feedback est plus important sur les apprentissages cognitifs et moteurs que sur les apprentissages en matière de motivation et de comportement. Wisniewski et al. (2020) soutiennent que les élèves tirent un grand profit du feedback riche en informations car celui-ci les aide non seulement à comprendre quelles erreurs ils ont commises, mais aussi pourquoi ils les ont commises et ce qu'ils peuvent faire pour les éviter la prochaine fois. La suite de notre analyse portera uniquement sur le feedback riche en informations. Par ailleurs, la question de la source du feedback se pose.

Le feedback est fourni par un agent, concernant des aspects de la performance ou de la compréhension d'un individu (Hattie et Timperley (2007)). Il peut donc être fourni soit par une source extérieure (enseignant, pair, parent) soit, de manière intrinsèque, par la tâche elle-même (e.g., par la tablette numérique elle-même). Il a par exemple été montré de fortes corrélations entre les résultats d'évaluations de leçons d'histoires chez des étudiants, selon que les évaluations aient été réalisées par des enseignants ou par des ordinateurs programmés pour cela, ce qui atteste de la fiabilité des appareils numériques (Ferster, Hammond, Alexander, & Lyman, 2012). Ces auteurs suggèrent que l'outil informatique peut être un moyen d'accroître le feedback à chaque apprenant. De plus, certains chercheurs soutiennent que les feedbacks fournis par les outils numériques peuvent améliorer la compréhension et les stratégies cognitives, car les outils numériques peuvent aujourd'hui fournir des feedbacks individuels adaptés (Máñez & Vidal-Abarca, 2020). Dans cette perspective les applications éducatives pourraient intégrer les feedbacks afin d'améliorer l'apprentissage.

En résumé, une application éducative doit intégrer les quatre piliers d'apprentissage susmentionnés (apprentissage actif, apprentissage significatif, interaction sociale, apprentissage engagé), ainsi que le feedback qui est central dans la compréhension et la maîtrise de la tâche.

Lors d'un apprentissage sur tablette, le feedback est fourni par la tablette elle-même tandis qu'en classe, c'est l'enseignant qui fournit le feedback à l'élève. S'il est vrai que nous ne pouvons pas mettre au même niveau l'enseignant et le dispositif technologique, puisque celui-ci est la plupart du temps programmé à l'avance alors que l'enseignant s'adapte à l'évolution de l'enfant tout au long de l'activité, tous deux jouent le même rôle : assister et guider l'élève lors d'un apprentissage. Une application numérique qui fournit des feedbacks à l'apprenant reproduit un contexte social d'apprentissage dans la mesure où tout comme l'enseignant, l'application numérique interagit avec l'apprenant par le biais du feedback. De même, il serait logique de penser que lorsque les interfaces tactiles respectent les critères ergonomiques d'utilisabilité (Brangier & Bastien, 2010), les concepteurs peuvent y reproduire un contexte similaire aux contextes tangibles d'apprentissage.

Considérées ensemble, la propriété d'affordance (intuitivité perceptive), le respect du critère d'engagement (disposition des éléments graphiques sur l'interface graphique) et les feedbacks intrinsèques (fournis par la tablette) nous conduisent à considérer l'interface d'une tablette numérique comme un contexte d'apprentissage. Dans la suite de cette thèse, nous le désignerons sous le vocable de *contexte numérique d'apprentissage*. Ce dernier renvoie précisément aux éléments perceptifs visuels et auditifs qui environnent la tâche au sein de l'interface graphique de présentation. Aussi, appellerons-nous les tâches présentées sur tablettes numériques *les tâches numériques*, par opposition aux tâches présentées avec des objets tangibles que nous désignerons par *tâches tangibles*.

Par ailleurs, si des critères sont pris en compte dans la conception des applications des tablettes pour favoriser l'apprentissage chez l'enfant, faisant de l'interface d'une tablette numérique un contexte numérique d'apprentissage, il n'est pas garanti que les enfants puissent apprendre sur ces outils. Dans les lignes qui vont suivre, nous verrons dans quelle mesure les enfants apprennent sur des outils numériques.

## **1.4. Appareils numériques et apprentissage**

Aujourd'hui, plus les appareils numériques et les réseaux sociaux se développent plus leur usage augmente, y compris chez les enfants (Rideout et al., 2010). Dès la petite enfance, ces derniers pourraient apprendre à partir des outils numériques et profiter des connaissances qu'ils renferment (Strouse & Troseth, 2008). Les applications proposées sur les tablettes numériques sont, de ce fait, susceptibles d'agir sur la qualité d'apprentissage et les habiletés des enfants qui en font usage (Hoareau et al., 2020).

### **1.4.1. De la possibilité d'une amélioration du développement cognitif**

Partant des stimulations cognitives qu'il permet, l'usage des outils numériques améliorerait les performances intellectuelles chez les individus (Johnson, 2013). Plusieurs constats autorisent à faire l'hypothèse selon laquelle le développement cognitif pourrait également être favorisé. En 2013, un avis de l'Académie des Sciences soutient par exemple que les écrans tactiles peuvent favoriser le développement cognitif. De 0 à 2 ans, ils favorisent la stimulation visuelle, de 2 à 6 ans, ils favorisent le développement de la pensée symbolique, et de 6 à 12 ans, ils favorisent la flexibilité cognitive et l'intelligence fluide. Néanmoins, cet avis précise que lorsque les enfants ne sont pas éduqués à une pratique modérée et autorégulée des écrans tactiles, ceux-ci peuvent avoir un impact négatif, notamment un manque d'activité physique, une détérioration du lien social et une perturbation du rythme veille-sommeil.

L'apprentissage à l'aide du numérique a pour particularité de rendre accessibles de très nombreuses informations. C'est la raison pour laquelle l'enfant doit trier les informations pertinentes pour effectuer une tâche (Giedd, 2012). Différentes fonctions cognitives sont ainsi exercées. L'enfant doit d'une part, focaliser son attention sur les seules informations pertinentes, et l'inhibition des informations inutiles est requise pour réussir la tâche. D'autre part, il doit également partager ses ressources attentionnelles entre le maintien des informations

pertinentes et l'analyse des nouvelles informations, afin de décider si ces dernières doivent aussi être sélectionnées (Boot, Kramer, Simons, Fabiani, & Gratton, 2008). Une littérature croissante souligne que les jeux vidéo favorisent le développement des fonctions cognitives telles que le contrôle attentionnel (voir Mayer, 2016 ; Tettegah, McCreery, & Blumberg, 2015, pour une revue). Boot et al. (2008) ont montré par exemple que des élèves experts en jeux vidéo ont de meilleures performances que ceux de niveau intermédiaire, à des tâches d'attention visuelle, de contrôle cognitif et de raisonnement. Ces derniers ont à leur tour de meilleures performances que des élèves novices. Un usage fréquent des jeux vidéo semble donc avoir un effet bénéfique sur certains aspects du développement cognitif. Cela permet par exemple d'exercer le raisonnement afin de découvrir comment les éléments du jeu doivent être traités pour atteindre l'objectif. Par ailleurs, les jeux dans lesquels les difficultés sont présentées de manière croissante favorisent la stimulation cognitive et semblent améliorer les capacités d'apprentissage des enfants (Hamari, et al., 2016). Le défi que propose un jeu peut en effet motiver le joueur à poursuivre son effort pour dépasser chaque niveau du jeu. À mesure que le jeu se complexifie, l'enfant s'engage davantage, émet des hypothèses et développe des stratégies cognitives pour atteindre chaque niveau du jeu jusqu'au but.

La première fonction que les jeunes enfants attribuent aux appareils numériques est celle du divertissement (Eisen & Lillard, 2016). Les jeux vidéo pourraient donc être le moyen par lequel les appareils numériques agissent directement sur la motricité et la cognition des jeunes enfants. Dans une étude menée auprès d'enfants âgés en moyenne de 5 ans et 5 mois, Hsiao et Chen (2016) ont montré que jouer à un jeu en interagissant avec un écran améliore les performances à une tâche de correspondance mot/couleur, ainsi que les mouvements de coordination et l'agilité. Ils ont entraîné un groupe d'enfants à produire des gestes en interagissant avec l'écran lors de la pratique d'un jeu vidéo, tandis que d'autres jouaient au même jeu dans une version tangible. Les enfants devaient effectuer des exercices de

coordination (taper sur une balle avec les pieds sans la faire tomber), et d'agilité (se tenir en équilibre après avoir fait trois allers-retours entre deux points distants de 2m). Ils devaient également retenir les noms des couleurs des balles en les attrapant. Les résultats indiquent que les enfants ayant interagi avec le jeu vidéo étaient plus performants aux deux tâches d'habiletés motrices et à la tâche de correspondance, que leurs pairs ayant complété les exercices en condition tangible. Les auteurs concluent que cette différence de performances est due au fait que les enfants ayant joué sur le numérique s'adaptent mieux au matériel d'apprentissage, et donc améliorent leurs performances. Ainsi, par des mouvements plus orientés et synchronisés avec l'outil numérique, les enfants s'exercent et amélioreraient leurs mouvements moteurs et leur flexibilité cognitive.

Par ailleurs, l'influence du numérique sur le développement cognitif est fonction de son contenu. Celui-ci doit avoir une signification pour l'enfant et être accessible à sa compréhension (Hirsh-Pasek et al., 2015). De plus, le degré d'attention porté à la tâche est une variable importante. Les enfants apprennent mieux lorsqu'ils sont cognitivement engagés, c'est-à-dire lorsqu'ils focalisent leur attention sur la tâche à réaliser. Par exemple, un déficit attentionnel est observé chez des enfants lorsque le contenu d'un programme télévisé s'éloigne de la réalité (Lillard & Peterson, 2011). Pendant neuf minutes, les auteurs ont proposé à des enfants de 4 ans soit un dessin animé irréaliste c'est-à-dire avec des séquences d'actions et des personnages qui ne traduisent pas la réalité (e.g., une éponge qui parle, qui possède une maison) ; soit un dessin animé éducatif, c'est-à-dire avec des personnages et une histoire à visée éducative (e.g., un garçon qui ne part pas à l'école et qui est puni) ; soit une histoire racontée oralement. Les enfants étaient par la suite soumis à des tests cognitifs (test d'inhibition Head, Toes, Knees, Shoulders et Tour de Hanoi). Les résultats indiquent que les enfants exposés au dessin animé irréaliste étaient moins performants aux tests cognitifs que leurs pairs exposés aux deux autres conditions. Les auteurs concluent que le rythme des séquences du dessin animé irréaliste, ainsi

que leur absence de cohérence avec la réalité, demandaient aux enfants un effort d'encodage trop important et entraînait chez eux un épuisement des ressources attentionnelles disponibles pour les tests cognitifs. Certains chercheurs estiment d'ailleurs que pour améliorer la conception et la présentation des animations virtuelles, il faut segmenter l'animation en de courtes séquences dont la taille est compatible avec les capacités de traitement de la mémoire de travail, et attirer explicitement l'attention de l'apprenant sur les séquences pertinentes (Boucheix, 2018).

Les appareils numériques offrent ainsi aux enfants plusieurs possibilités d'apprentissage, qu'il s'agisse de tâches numériques assistées (avec feedback, tutoriel) ou de jeux vidéo.

#### **1.4.2. De la facilité d'apprentissage**

À partir des outils numériques, de nombreuses tâches peuvent être réalisées via des formats d'informations dynamiques et multimédia attractifs (Amadiou & Tricot, 2006, 2014). Ils pourraient ainsi offrir à l'enfant des occasions d'apprentissages variés, du fait d'un accès aisé et rapide à de multiples informations. La révolution numérique est marquée par des particularités liées aux générations successives d'outils. Les caractéristiques de portabilité et de connectivité des tablettes numériques ont entraîné l'émergence d'une nouvelle forme d'apprentissage dite *mobil learning* (apprentissage mobile, Johnson, 2013). Cependant, l'usage du numérique ne semble pertinent que lorsqu'il vise l'acquisition d'une connaissance précise. Apprendre en se basant sur les progrès technologiques nécessite en effet que ces derniers soient intégrés à l'apprentissage de manière structurée (Schwartz, 2014).

Une intégration structurée du numérique dans les apprentissages repose en particulier sur une utilisation dans des contextes multiples afin d'en faciliter la généralisation. Une étude de Ferrer, Belvis et Pàmies (2011) a montré que les parents et les professionnels de l'éducation ont une perception positive des effets de la tablette sur l'apprentissage. Cette étude a montré

une réduction des inégalités socio-éducatives entre des élèves de 10-11 ans issus de milieux sociaux différents, grâce à l'utilisation des tablettes numériques à l'école et à la maison. Les élèves en difficulté scolaire déclaraient qu'ils participaient plus en classe après avoir utilisé les tablettes numériques et ont par ailleurs vu leurs performances scolaires s'améliorer.

La revue de littérature conduite par Haßler, Major et Hennessy (2016) soutient également que la tablette présente des atouts pédagogiques. En effet, sur 23 études examinées, 16 indiquent un effet positif de la tablette sur l'apprentissage des élèves. Pour les auteurs, la bonne utilisabilité de la tablette, la multiplicité des fonctions qu'elle renferme, les interactions contingentes qu'elle permet, sont autant d'atouts qui lui confèrent une efficacité pédagogique. Cependant, cet effet positif de la tablette sur l'apprentissage ne permet pas forcément de conclure sur une possible supériorité sur les outils pédagogiques traditionnels. Les études qui valident son efficacité ne comparent pas, en effet, les situations d'apprentissage sur ou hors tablette. Une étude récente a par exemple montré que des enfants de 5 à 6 ans apprennent mieux les noms des États d'un pays (e.g., Australie) et leur position géographique lorsqu'ils reçoivent une leçon ordinaire que lorsqu'ils apprennent seuls avec une tablette (Eisen & Lillard, 2020). Une tablette peut alors présenter un intérêt pédagogique du fait qu'elle ait été jugée acceptable pour réaliser une tâche précise, sans pour autant être plus efficace qu'une situation d'apprentissage tangible. Acceptabilité n'est pas synonyme d'efficacité.

L'acceptabilité des tablettes dépend de la nature des tâches réalisées avec elles, et du degré de compatibilité de la tâche avec les caractéristiques de la tablette (Amadiou et al., 2019). De plus, dans son rapport sur les fonctions pédagogiques pour les apprentissages scolaires réalisés pour le Centre National d'Etudes du Système Scolaire, Tricot (2020) analyse 50 méta-analyses. Il a recensé 24 fonctions pédagogiques des outils numériques, et montre néanmoins à l'issue de cette analyse que les outils numériques ne suffisent pas en eux-mêmes à améliorer considérablement les apprentissages, car ils peuvent à la fois les améliorer mais aussi les

détériorer. Pour cette raison, la conception des tablettes numériques doit être orientée vers l'acquisition d'une connaissance précise, tout en favorisant la réalisation de la tâche par leur facilité d'usage.

En dépit des nombreux atouts techniques que présente une tablette numérique, son acceptabilité peut varier en fonction du type de tâches proposées. L'étude de Eisen et Lillard (2016) a montré que des enfants de 4-6 ans préfèrent réaliser une tâche sur un outil numérique lorsque que celui-ci est utile pour la réalisation de la tâche. Pour des tâches de connaissance animale (e.g., « si vous vouliez en savoir plus sur les chiens, lequel de ces outils serait le plus approprié ? »), ils préfèrent par exemple le livre traditionnel plutôt que les écrans tactiles. Cette préférence s'explique par le fait que les écrans tactiles présentent une fonction davantage ludique que d'apprentissage. De ce point de vue, l'acceptabilité d'une tablette n'est pas figée, mais elle fluctue en fonction de la tâche à réaliser. Il est par ailleurs important de distinguer la tâche d'apprentissage et la tâche d'utilisation de la tablette, cette dernière consistant essentiellement en une manipulation des fonctions de l'outil numérique pour atteindre les objectifs de la tâche d'apprentissage à réaliser (Amadiou & Tricot, 2014). La tâche d'utilisation doit par conséquent soutenir la tâche d'apprentissage, car cette dernière reste la plus importante. Or, les études qui évaluent l'acceptabilité des tablettes considèrent généralement uniquement la tâche d'utilisation (Amadiou et al., 2019). C'est seulement lorsque l'apprentissage sur tablette considère tous ces facteurs, que la tablette numérique facilite l'apprentissage.

Un outil numérique n'est donc pas toujours bien accepté par les enfants pour réaliser une tâche. Pour un même outil, l'enfant peut avoir différentes perceptions, d'autant plus que les capacités cognitives y sont sollicitées en fonction des exigences de la tâche d'apprentissage. Le contenu des exercices présentés sur appareil numérique doit donc être élaboré en fonction des habiletés cognitives et motrices des enfants. Par ailleurs, au-delà de la nécessité d'élaborer des jeux et applications pour faciliter l'apprentissage chez les enfants, il convient de s'interroger

sur les conditions d'un transfert des apprentissages entre tâches numériques et tâches tangibles.

C'est l'objectif du chapitre qui va suivre.

### 2.1. Généralités

Le transfert d'apprentissage a longtemps été considéré comme une activité cognitive dont la réalisation implique une correspondance stricte entre des éléments communs à deux tâches : c'est le modèle des éléments identiques (Thorndike & Woodworth, 1901). Une telle acception du transfert est restrictive, dans la mesure où une connaissance acquise dans une première tâche peut être ré-utilisée dans une nouvelle tâche en certains points différents. Dans cette perspective, le transfert d'apprentissage repose sur des processus cognitifs qui permettent l'adaptation des connaissances antérieures à des nouvelles tâches, nouvelles tâches qui partagent certains éléments avec les tâches d'acquisition sans pour autant être strictement identiques (Nokes, 2009; Reed, 2012).

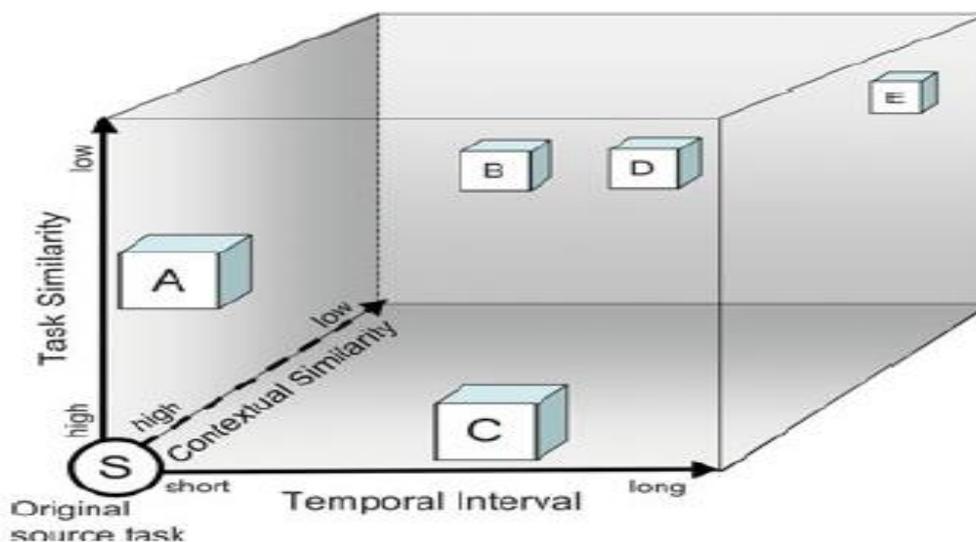
Pour transférer une connaissance d'une tâche à une autre, l'individu doit tenir compte de toutes les similarités entre celles-ci (Forsyth, 2018) : nous y reviendrons plus bas. Chez l'enfant, le transfert est généralement observable lorsque les tâches sont similaires et appartiennent au même domaine de connaissances (Aladé, Lauricella, Beaudoin-Ryan, & Wartella, 2016 ; Cartwright et al., 2020; Marcus, Haden, & Uttal, 2017). Selon Klahr et Chen (2011), ce constat pose deux questions. D'une part, comment expliquer les fréquents échecs de transfert observés lorsque des tâches, pourtant similaires, appartiennent à des domaines de connaissances différents, c'est-à-dire les échecs au *far transfer* (transfert lointain) ? D'autre part, quel rôle attribuer aux contextes d'apprentissage, dans la mesure où toute connaissance est toujours acquise dans un contexte déterminé ? Le modèle de Klahr et Chen (2011), sur lequel nous revenons maintenant, tente d'apporter des réponses à ces questions.

## 2.2. Modèle conceptuel tridimensionnel du transfert (Klahr & Chen, 2011)

Dans leur modèle (*cf.* Figure 5), Klahr et Chen (2011) soutiennent qu'il y a trois facteurs explicatifs du transfert : la similarité des tâches, la similarité des contextes, et l'intervalle temporel.

### 2.2.1. La similarité des tâches

Capitalisant sur une longue tradition de recherches ayant montré le rôle majeur des similarités entre tâches, le modèle prévoit que la survenue du transfert est en partie fonction du degré de similarité entre tâches. La tâche principale et la tâche de transfert partagent des caractéristiques telles que le domaine de connaissances (mathématiques, physique, etc.), le format de présentation (bois, carton, etc.), le matériel utilisé (texte, image, etc.), les procédures et le principe de résolution (Barnett & Ceci, 2002). Plus les problèmes partagent d'éléments identiques plus ils sont similaires, et donc plus la probabilité d'observer le transfert est grande. La difficulté à matérialiser cette idée survient lorsqu'il faut définir une « métrique de similarité » (Cauzinille-Marmèche, 1990). Deux types de similarité sont classiquement distingués : similarité de surface et similarité de structure (Bracke, 1998).



**Figure 5.** Modèle du transfert tridimensionnel de Klahr et Chen (2011).

Dans cette figure, l'axe des abscisses (x) correspond à l'intervalle de temps entre l'acquisition de la connaissance dans la tâche principale et sa ré-utilisation dans la tâche de transfert. L'axe des ordonnées (y) correspond au degré de similarité entre la tâche principale et la tâche de transfert. L'axe des côtés (z) correspond à la similarité des contextes de présentation de la tâche principale et de la tâche de transfert. Le cercle inférieur gauche (S) représente la tâche principale (*Source*). Les cubes étiquetés représentent les tâches de transfert et ce, à différents endroits le long des trois dimensions. Les différentes positions des cubes dans l'espace ainsi que leurs tailles respectives traduisent le degré de transfert. Le problème A correspond à une forte probabilité de transfert : forte similarité de contextes (position à l'avant-plan de la figure), similarité moyenne des tâches, intervalle de temps court entre l'acquisition de la connaissance et son transfert. Le problème E représente une faible probabilité de transfert, avec de très faibles similarités entre les tâches ainsi qu'entre les contextes, et un intervalle de temps long. Entre ces deux probabilités de transfert, forte et faible, on trouve des niveaux intermédiaires. Par exemple, le problème C correspond à une probabilité de transfert moyenne, avec des tâches très similaires, des contextes très similaires, mais un intervalle temporel relativement long.

**Encart 2.** Description du modèle tridimensionnel de Klahr et Chen (2011)

### ***2.2.1.1. Similarité de surface***

Entre deux problèmes, le partage de certains éléments de surface donne lieu à ce que les chercheurs appellent la similarité de surface. Ces éléments de surface peuvent être des matériaux tangibles, des entités décrites dans un énoncé (Chi & Vanlehn, 2012). Ils peuvent être remplacés par d'autres éléments sans pour autant modifier la structure même du problème, et correspondent de ce fait à « l'habillage » du problème (Cauzinille-Marmèche, 1990). La similarité de surface entre deux tâches facilite le transfert, en particulier chez l'enfant, car elle permet à ce dernier d'établir un lien direct entre les tâches (Blöte, Resing, Mazer, & Van Noort, 1999; Carr, Kurtz, Schneider, Turner, & Borkowski, 1989; Chi & Vanlehn, 2012; Brown, Kane, & Echols, 1986). La similarité perceptive est un bon exemple du rôle des similarités de surface dans la mise en correspondance entre deux tâches. Thibaut et al. (2010) ont montré que des enfants de 6 ans parviennent à mieux résoudre des problèmes perceptifs analogues, lorsqu'ils ne sont pas perturbés par des distracteurs. Dans une première condition, les tâches sont présentées sans distracteur : les stimuli non-analogues ne partagent aucune caractéristique avec le stimulus analogue. Dans une deuxième condition, il y a un conflit : parmi les stimuli non-analogues, un stimulus partage une caractéristique avec le stimulus analogue (e.g., la même

couleur pour l'analogie forme et la même forme pour l'analogie couleur). Dans cette dernière condition, les enfants font près de 50% d'erreurs perceptives, contre 20% dans la condition sans distracteurs. Les auteurs soutiennent que les enfants de 6 ans ont été en difficulté pour effectuer toutes les comparaisons entre les stimuli qui font partie de la solution analogique et les autres stimuli. Ces résultats suggèrent que les enfants se basent activement sur les aspects perceptifs des stimuli pour établir des similarités. Nous reviendrons en détail sur cette étude plus tard dans notre analyse. Par ailleurs, les éléments de surface permettent dans une certaine mesure d'accéder à la structure du problème (Chi & Vanlehn, 2012).

### *2.2.1.2. Similarité de structure*

La résolution d'un problème obéit à des règles, étapes, procédures d'action, principes de résolution : c'est la structure du problème. Celle-ci est définie par les éléments constitutifs de la tâche qui ne peuvent être modifiés sous peine de modifier la logique de résolution de celle-ci (Gentner & Toupin, 1986; Sander & Richard, 2005). Deux tâches répondant à la même structure de résolution sont dites similaires en structure. La similarité de structure est relativement indépendante de la similarité de surface, la structure d'une tâche étant de nature plutôt abstraite tandis que les éléments de surface permettent de qualifier concrètement une tâche. La difficulté à transférer, souvent relevée chez les enfants, vient en partie du fait que la similarité de structure entre tâches est plus difficile à percevoir, précisément du fait de la nature abstraite de la structure des tâches. C'est là qu'intervient l'effet facilitateur des similarités de surface. Lorsque les éléments de structure communs aux deux tâches ne sont pas saillants, les similarités de surface peuvent servir d'indices pour activer la similarité de structure (Reed, 2012 ; Holyoak & Koh, 1987). Pour cette raison, les deux types de similarité se complètent. Un enfant peut également apprendre à déceler les relations entre les éléments de surface pertinents d'une tâche puis déduire les implications de ces relations pour la résolution du problème. Ceci permet

une compréhension profonde de la structure de la tâche, facilitant ainsi le transfert à une tâche similaire (Chi et Vanlehn, 2012).

Par ailleurs, une tâche est toujours réalisée dans un environnement. Pour cette raison, les similarités entre tâches ne suffisent pas pour expliquer la survenue du transfert, car il faut également considérer les contextes de présentation des tâches.

### **2.2.2. Similarité des contextes**

Tâche et contexte sont indissociables. La recherche en psychologie cognitive a montré que le rappel des connaissances en mémoire est dépendant du contexte d'apprentissage (Basque, 2004; Godden & Baddeley, 1975; Tulving & Thomson, 1973). Le transfert d'apprentissage faisant appel à la mémoire, il est probable que le recours à des indices contextuels favorise le transfert, et ce d'autant plus que les contextes sont similaires (Klahr & Chen, 2011).

La similarité des contextes peut porter sur des aspects sociaux, c'est-à-dire des personnes qui co-réalisent la tâche avec l'individu (travail collectif), ou une personne qui aide l'enfant à résoudre un problème. Pressau (2000) a par exemple montré que des enfants de dernière année d'école élémentaire résolvaient seuls mieux des problèmes mathématiques cibles, lorsque qu'un adulte ou un autre enfant les avaient aidés à résoudre des problèmes sources. C'est également cet effet de contexte social que l'on retrouve dans l'apprentissage orienté vers la découverte de solution (voir Honomichl & Chen, 2012, pour une revue). La similarité contextuelle peut également porter sur les lieux où sont réalisées les tâches (salle de classe, laboratoire, domicile). Par exemple, Saufley, Otaka, et Baversco (1985) ont montré que des étudiants de psychologie qui passaient un premier examen dans une classe, puis un second examen dans la même salle, avaient des meilleurs résultats que leurs pairs qui changeaient de salle.

Enfin, le contexte peut également porter sur les supports de présentation des tâches. Par exemple, une tâche peut être présentée en deux dimensions (2D) sur une interface graphique contenant des éléments de décor environnant la tâche. De ce point de vue, du fait de la nature tactile de l'écran de la tablette numérique et des éléments contenus dans son interface graphique, la tablette numérique constitue un contexte d'apprentissage, dit contexte numérique. A l'opposé, une tâche peut être présentée en trois dimensions (3D) sous forme d'objet tangible. Selon Moser et al. (2015) le support numérique d'apprentissage, en l'occurrence la tablette numérique, et le support tangible d'apprentissage, constituent deux contextes d'apprentissage différents, numérique vs tangible. Un même objet peut être présenté avec un support numérique (2D) ou un support tangible (3D), ce qui donne lieu à des représentations différentes dans la mémoire du très jeune enfant. Un objet tangible (e.g., bloc de bois en 3D) est par exemple représenté en tant qu'objet, mais le même objet présenté en version numérique (e.g., bloc de bois en 2D) n'est pas représenté en mémoire comme le symbole de l'objet mais comme une image à part entière, du fait de la difficulté de l'enfant à se représenter à la fois un objet et son symbole (DeLoache, 2000). Dans cette perspective, du fait de la nature du support de présentation (tablette numérique vs tangible), les enfants se représentent la tâche différemment : soit numérique, soit tangible, ce qui ne permet pas de déceler les similarités entre les tâches et par là rend le transfert difficile. Des études ont par exemple montré que les jeunes enfants réussissaient moins bien le transfert entre tâches présentées sous différentes dimensions (2D/3D ; 3D/2D), qu'entre tâches présentées sous les mêmes dimensions (3D/3D ; 2D/2D) (voir Barr, 2010, pour une revue).

La troisième dimension à prendre en compte dans le transfert est l'intervalle temporel.

### **2.2.3. L'intervalle temporel**

Tout apprentissage est censé servir à l'adaptation à une nouvelle situation qui survient ultérieurement. L'intervalle temporel s'écoulant entre les deux tâches peut aller de quelques

minutes à plusieurs dizaines d'années. Le modèle de Klahr et Chen (2011) prévoit qu'un intervalle temporel trop grand fait baisser la qualité du transfert, du fait qu'il affecte les capacités de l'enfant à se rappeler un apprentissage antérieur. Une recherche a montré que chez des élèves de cinquième année d'école élémentaire, lorsque 10 mois s'écoulaient entre une tâche d'entraînement à la compréhension de mots et une tâche de transfert similaire à la tâche d'entraînement, le nombre de réponses correctes diminuait (Gellert, Arnbak, Wischmann, & Elbro, 2021). Henry, Messer, et Nash (2014) ont montré que des enfants de 8 ans sont capables de transfert après un intervalle temporel de 6 mois. Pendant six semaines, les enfants étaient entraînés à une tâche de rappel, et six mois plus tard les enfants étaient soumis à des épreuves de compréhension et d'orthographe. Leurs performances étaient comparées à celles d'un groupe contrôle n'ayant pas reçu l'entraînement. Les enfants ayant reçu l'entraînement avaient des meilleures performances que leurs pairs. Néanmoins, douze mois après, ils repassaient encore les mêmes épreuves, mais leurs performances avaient baissé. Sur une durée plus courte, Clément (2001) a montré que des enfants de 7 ans étaient capables de transférer des habiletés de résolution de problème à un mois d'intervalle entre deux tâches. L'ensemble de ces résultats laisse supposer qu'un intervalle temporel court est plus propice à obtenir un transfert efficace.

Selon Klahr et Chen (2011), leur modèle permet de faire des prédictions dans trois directions. Premièrement, le degré de similarité entre les tâches et entre leurs contextes de présentation permet de prédire la qualité du transfert. Deuxièmement, l'âge permet de prédire le mode de transfert, les jeunes enfants montrant un *near transfer* (transfert proche) relativement robuste, tandis que les enfants plus âgés montrent également une capacité de *far transfer*. Troisièmement, fournir des consignes directes et explicites est favorable au *near transfer*, alors qu'offrir une expérience avec le dispositif de la tâche permet une découverte du principe de résolution et est favorable au *far transfer*. Dans notre travail de thèse, nous nous sommes principalement intéressés au fait que la qualité du transfert est proportionnelle au degré de

similarité entre les tâches et entre les contextes.

Par ailleurs, en considérant les similarités des tâches et celle des contextes, le modèle de Klahr et Chen (2011) permet de distinguer le *near transfer* du *far transfer*. Nous revenons à présent plus en détail sur cette distinction.

#### **2.2.4. Near transfer vs Far transfer**

La distinction entre *near transfer* et *far transfer* permet d'analyser les conditions dans lesquelles le transfert est plus efficace. De nombreuses études soutiennent que le *near transfer* est observable lorsque les tâches partagent la même structure et présentent aussi un fort degré de similarité de surface (Chang, Rosenberg-Lee, Qin, & Menon, 2019; Clerc, Leclercq, Paik, & Miller, 2021; Jacobson et al., 2020) ; lorsqu'elles appartiennent au même domaine de connaissances (Aladé et al., 2016; Sala & Gobet, 2017) ; lorsqu'elles sont présentées sur le même support (Moser et al., 2015; Zack, Gerhardstein, Meltzoff, & Barr, 2013). C'est ce qui est observé par exemple entre une tâche de rappel de chiffres et une tâche de rappel de mots (Henry et al., 2014). En revanche, lorsqu'un transfert est observé entre des tâches qui partagent des faibles similarités et qui sont présentées dans des contextes différents, on parle de *far transfer* (Barnett & Ceci, 2002). C'est le cas par exemple entre une tâche qui consiste à mesurer un animal et celle qui consiste à mesurer un robot (Aladé et al., 2016). *Le far transfer* est observé plus rarement, car il porte sur des processus plus généraux. Certaines études se sont intéressées à ce type de transfert, car il permettrait d'évaluer le bénéfice d'une stratégie ou d'un entraînement (Noack, Lövdén, Schmiedek, 2014; Shipstead, Redic, & Engle, 2010), mais rapportent des résultats peu optimistes sur la survenue du *far transfer*.

Certains chercheurs pensent qu'il est difficile d'observer le *far transfer* comparativement au *near transfer*, du fait que dans le paradigme des tâches isomorphes, la similarité des tâches est définie par le chercheur, de même que le contexte d'apprentissage. Ceci représenterait une approche du transfert restrictive, car elle ne laisse pas à l'enfant la possibilité

de choisir lui-même les similarités sur lesquelles baser son transfert, ne permettant pas ainsi d'observer un *far transfer* (Martina & Schwartz, 2005; Schwartz, Bransford, & Sears, 2005; Robello et al., 2005). Une des tentatives les plus abouties pour comprendre les conditions de survenue du *far transfer* est la taxonomie proposée par Barnett et Ceci (2002). Ces auteurs envisagent deux facteurs explicatifs (cf. Figure 7) : le contenu (la connaissance à transférer) et le contexte (le domaine de connaissances). Cette taxonomie propose un certain principe de base qui permet de prédire le *far transfer*, tel qu'un principe de systèmes complexes généralisable à des tâches relevant pourtant de domaines différents (Goldstone & Wilensky, 2008; Jacobson et al., 2020). On en trouve un exemple chez Chen et Klahr (1999), qui ont entraîné des enfants de 7 à 10 ans à utiliser une stratégie de contrôle des variables (Control of Variables Strategy, CVS). 7 mois plus tard, les enfants devaient appliquer cette stratégie dans un domaine différent de celui de la phase d'apprentissage. La CVS a été correctement transférée mais uniquement par les enfants de 10 ans, ce qui atteste de la difficulté du *far transfert*. Au demeurant, la réussite d'un *far transfer* reste assez rare dans les études expérimentales. Gellert et al. (2021) ont montré que des enfants de 5<sup>ème</sup> année d'école élémentaire échouaient à transférer le bénéfice d'un entraînement à l'analyse morphologique des mots, dans une tâche de compréhension de texte contenant des mots morphologiquement différents des mots ayant servi de support à l'entraînement. Henry et al. (2014) ont montré que les enfants de 8 ans ne parvenaient pas à transférer le bénéfice d'un entraînement de la mémoire de travail dans une tâche de vocabulaire. van Bers, van Schijndel, Visser, et Raijmakers (2020) ont montré que les enfants de 3 ans peuvent transférer le bénéfice d'un entraînement de la flexibilité cognitive à d'autres tâches de flexibilité cognitive, traduisant une situation de *near transfer*. En revanche, ce bénéfice n'est pas transférable aux tâches mesurant les autres fonctions exécutives, traduisant à nouveau un échec du *far transfer*. Ceci montre que même des compétences entraînées sont mieux transférées dans des situations de *near transfer* que dans des situations de *far transfer*. C'est ce

qui ressort également de la méta-analyse de Sala et Gobet (2017). Ces derniers ont montré que les personnes qui pratiquent activement la musique et jouent fréquemment aux échecs ont une meilleure capacité cognitive globale que la population en général, et que la mémoire de travail est un prédicteur de la compétence aux échecs et de la compétence musicale. Néanmoins, les entraînements des compétences aux échecs, des compétences musicales et des capacités de la mémoire de travail, n'améliorent pas les compétences aux autres tâches ou activités cognitives. Le bénéfice de tels entraînements n'est en effet transférable que dans les tâches entraînées et, au mieux, dans d'autres tâches similaires caractérisant une situation de *near transfer*. Les auteurs suggèrent qu'au lieu de s'investir à chercher des preuves solides de l'existence du *far transfer* (Tricot & Sweller, 2014), les chercheurs devraient davantage chercher à comprendre les processus cognitifs qui sous-tendent le *near transfer*. L'existence de difficultés méthodologiques récurrentes dans les études testant le *far transfer* (groupe contrôle passif, matériel inapproprié, etc.) est un argument supplémentaire en faveur de l'investissement des efforts de recherche dans l'étude du *near transfer* (Shipstead et al., 2010).

Le *near transfer* est observé assez fréquemment dans la littérature. De nombreuses études ont permis de montrer la réussite du *near transfer* chez l'enfant (Aladé et al., 2016; Henry et al., 2014; Lorch et al., 2014; Moser et al., 2015; Riggs, Alibali, & Kalish, 2015; van Bers et al., 2020; Zack et 2013), et de ce fait certains chercheurs soutiennent que l'intérêt d'étudier le *near transfer* est moindre, du fait qu'il soit fréquemment observé (Shipstead et al., 2010). Néanmoins, des récentes recherches montrent que les enfants peuvent aussi échouer au *near transfer* (Clerc et al., 2021; Gellert et al., 2021; Resch, Keulers, Martens, Heugten, & Hurks, 2019 ; Resing, Bakker, Pronk, & Elliott, 2016). Pour cette raison, dans cette thèse nous nous intéresserons aux deux types de transfert, avec un intérêt particulier pour le *near transfer*.

Une explication souvent évoquée pour rendre compte des échecs au *near transfer* est un niveau de compréhension de la structure de la tâche principale insuffisant pour permettre le

transfert (Chi & Vanlehn, 2012). Pour aider les enfants à approfondir la compréhension de la structure de la tâche principale, ces auteurs proposent d'offrir un entraînement spécifique. Clerc et al. (2021) ont montré que des enfants d'âge préscolaire entraînés à produire une stratégie d'autorépétition pour rappeler une série de mots, parviennent à transférer efficacement cette stratégie pour rappeler correctement une autre série de mots. Ce n'est pas le cas pour leurs pairs non-entraînés qui transfèrent la stratégie mais de manière moins efficace, montrant par là une déficience d'utilisation due au transfert (t-UD). Le bénéfice d'un entraînement a été également observé entre deux tâches de flexibilité cognitive (Van Bers et al., 2020), deux tâches de mémoire de travail (Henry et al., 2014) et entre deux tâches de compréhension (Gellert et al., 2021). Pour confirmer l'efficacité de l'entraînement sur le *near transfer*, de tels résultats méritent d'être répliqués avec d'autres types de tâches : dans cette thèse nous tenterons de le faire avec des tâches de Tour de Hanoi.

Par ailleurs, parce que le transfert permet de réutiliser des connaissances déjà acquises pour en acquérir de nouvelles et évite ainsi à l'individu d'avoir à tout ré-apprendre à chaque nouvelle tâche, il revêt une importante dimension adaptative. Celle-ci représente néanmoins un réel défi pour l'enfant, qui doit adapter la connaissance, initialement acquise en tâche principale, aux exigences et caractéristiques de la tâche de transfert.

### **2.3. La dimension adaptative du transfert**

La nécessité d'adapter la connaissance à la tâche de transfert rend celui-ci difficile à effectuer, en particulier du fait des différents types de similarités existant entre les tâches (Forsyth, 2018). L'apprenant doit en effet repérer les similarités entre les tâches et adapter la connaissance apprise antérieurement, à la nouvelle tâche. Il opère ainsi un ensemble de traitements cognitifs successifs, que les chercheurs ont décrit avec précision dans le cas du transfert analogique entre tâches isomorphes : encodage de la situation-cible (tâche à réaliser) et récupération en mémoire de la situation-source (tâche antérieurement réalisée et souvent

isomorphe à celle à réaliser) associée à la solution (*accessing*) ; comparaison des deux situations afin d'établir les correspondances entre les éléments des deux tâches (*matching*) ; évaluation des correspondances pour produire davantage d'inférences servant à amplifier le lien entre les deux tâches (*mapping*) ; ajustement des éléments de la source aux éléments de la cible dont la correspondance n'avait pas encore été établie (*adapting*) ; évaluation de l'existence d'une analogie entre les deux tâches (*evaluating soundness*) ; induction d'une structure commune entre les deux situations pour une éventuelle généralisation à la résolution des problèmes subséquents (*extraction common structure*) (Ripoll & Coulon, 2001). Dans le paradigme des tâches isomorphes, la tâche de transfert ne varie qu'en surface par rapport à la tâche principale mais constitue néanmoins une tâche nouvelle, nécessitant la mise en œuvre de processus d'adaptation (Schwartz et al., 2012).

Les éléments de surface sont déterminants, dans la mesure où ils permettent d'établir un lien entre tâche principale et tâche de transfert, les deux tâches partageant la même structure dans le cas de tâches isomorphes. Les relations sémantiques entre les éléments de surface de deux tâches peuvent par ailleurs favoriser le transfert, car elles permettent de déceler la structure commune aux deux tâches (Goldstone, & Day, 2012; Cauzinille-Marmèche, 1990; Gentner, & Toupin, 1986), ceci étant nécessaire pour pouvoir adapter la solution de la tâche principale à la tâche de transfert. Néanmoins, lorsque les éléments de surface portent sur des aspects perceptifs, le transfert d'apprentissage peut être entravé. Le rôle délétère des éléments interférents sur le transfert par analogie a été montré chez des participants âgés de 6, 8, et 14 ans (Thibaut et al., 2010). A l'aide d'une tâche perceptive de type  $A : B : C : ?$  (D est à C ce que B est A), les enfants devaient chercher la solution analogue parmi quatre stimuli. Des transformations étaient opérées sur la forme (même forme mais élargie ou aplatie) ou sur la couleur (même couleur mais plus foncée) des stimuli, et les enfants devaient faire des analogies à partir de ces transformations. Pour augmenter la difficulté de la tâche, le nombre de distracteurs perceptifs

augmentait respectivement dans trois conditions. Dans la première condition, il n'y avait pas de conflit, c'est-à-dire aucun distracteur : les stimuli non-analogues ne partagent alors aucune caractéristique avec le stimulus analogue. Dans la deuxième condition, il y avait un conflit : parmi les stimuli non-analogues, un stimulus partage une caractéristique avec le stimulus C (la même couleur pour l'analogie forme et la même forme pour l'analogie couleur). Dans la troisième condition, il y avait trois conflits, les stimuli non-analogues et le stimulus analogue partageant des caractéristiques avec les items A, B, et C.

Les résultats montrent que les enfants de 8 ans et les adolescents de 14 ans utilisaient spontanément l'analogie lorsqu'il n'y avait pas de conflit. En revanche, même en l'absence de distracteurs, les enfants de 6 ans commettaient des erreurs (20% environ). Ce résultat suggère qu'à 6 ans, les enfants éprouvent des difficultés à traiter efficacement le matériel perceptif. Thibaut et al. (2010) expliquent la difficulté des enfants de 6 ans par un coût cognitif élevé, provenant des interférences entre les distracteurs et les solutions analogues. Cette étude est particulièrement intéressante, car elle montre l'influence des éléments perceptifs dans le transfert d'apprentissage chez l'enfant. Curieusement, cette question reste encore peu documentée dans la littérature sur le transfert en résolution de problèmes. Elle sera analysée dans ce travail de thèse, via des tâches de résolution de problème de type Tour de Hanoi, pour observer l'effet des différences de surface perceptives sur les performances des enfants.

Par ailleurs, l'encodage du contexte de la tâche de transfert, et le recodage du contexte de la tâche principale, représentent une dimension à prendre en compte dans l'adaptation du principe de résolution de la tâche principale à la tâche de transfert (Ross, 1989; Sander & Richard, 2005). Lorsque l'encodage d'une situation initiale n'est pas adéquat à la résolution d'une nouvelle situation, les individus doivent nécessairement éliminer les critères inutiles et modifier leur représentation de la tâche principale pour construire celle de la tâche de transfert et trouver la solution (Sander & Richard, 2005). Il s'agit dans ce cas d'encoder le contexte de

la tâche de transfert pour construire une représentation de celle-ci, et de recoder le contexte de la tâche principale pour dégager le principe de résolution applicable à la nouvelle tâche en ignorant délibérément certains éléments contextuels non-pertinents. Dans cette perspective, la similarité de contextes est aussi importante que la similarité des tâches, et c'est en cela que le modèle de Klahr et Chen (2011) est novateur, car il est plus équilibré.

Dans ce modèle, la similarité des tâches et celle des contextes sont des dimensions d'égale importance dans la survenue du transfert. En effet, jusque-là, le transfert était évalué à partir des similarités des tâches, la dimension contextuelle étant par conséquent accessoire. Or, le transfert d'apprentissage consiste, dans une certaine mesure, en un processus d'encodage et de recodage respectivement des contextes de présentation de la tâche de transfert et de la tâche principale. Ceci a pour effet d'adapter le principe de résolution de la tâche principale à la tâche de transfert (Snader & Richard, 2005). Depuis la publication de ce modèle tridimensionnel par Klahr et Chen en 2011, il a été mentionné dans plus de 40 études empiriques sur le transfert d'apprentissage. Certaines de ces études utilisent des tâches tangibles et portent soit sur le transfert entre domaines de connaissances (Chen, Honomichl, Kennedy, & Tan, 2016; Lorch et al., 2014; Schweizer, Wüstenberg, & Greiff, 2013; Yagolkovskiy & Medvedev, 2019), soit sur les contextes sociaux d'apprentissage avec un apprentissage collaboratif parents-enfants (Jant, Haden, Uttal, & Babcock, 2014; Marcus, Haden, & Uttal, 2018) ou un apprentissage entraîné ou orienté par un adulte (Lamnina & Chase, 2019; Riggs, Alibali, & Kalish, 2015, 2017; Sidney & Thompson, 2019; Vogelaar & Resing, 2018; Ziegler, Edelsbrunner, & Stern, 2021). Néanmoins, il convient de préciser que les études portant sur le contexte social d'apprentissage se sont particulièrement intéressées au bénéfice d'un contexte social pour l'apprentissage, mais pas à l'effet de la similarité de ces contextes sociaux. A partir de là, l'importance de la similarité des contextes dans l'adaptation d'une connaissance à la tâche de transfert est encore à analyser.

L'apparition des outils numériques ces dernières décennies a permis de tester d'une manière originale la dimension contextuelle dans le transfert d'apprentissage. Une série de recherches a été conduite en considérant les supports numériques comme des contextes d'apprentissage et de transfert tout aussi valables que les supports tangibles (voir Barr, 2010, pour une revue). Ces études ont montré que le transfert d'apprentissage est meilleur lorsque les deux tâches sont présentées sur les mêmes supports (numérique/numérique ; tangible/tangible), confirmant le rôle de la similarité des contextes (Moser et al., 2015; Zack, Barr, Gerhardstein, Dickerson, & Meltzoff, 2009; Zack et al. 2013). Toutefois, aucune de ces études n'a directement testé le modèle de Klahr et Chen (2011), elles n'en font d'ailleurs même pas mention.

Le modèle de Klahr et Chen (2011) est difficile à tester, car il implique une variation du degré de similarité à la fois des tâches et des contextes. Pour cela, une des études de cette thèse sera consacrée à tester directement ce modèle, en localisant le contexte d'apprentissage directement sur l'interface graphique de la tablette numérique (contexte numérique d'apprentissage).

Le transfert d'apprentissage est la ré-utilisation d'une connaissance apprise et suffisamment maîtrisée, dans une nouvelle tâche qui partage un minimum d'éléments communs (mais pas tous) avec la tâche initiale, ce qui justifie les efforts d'adaptation à la nouvelle tâche. C'est en fonction des éléments communs aux deux tâches que l'individu choisit, dans sa base de connaissances en MLT, la connaissance à utiliser pour réaliser la nouvelle tâche. Pour cela, encore faut-il que l'individu, en l'occurrence l'enfant, ne soit pas perturbé, même par des détails perceptifs minimes de la tâche ou de son contexte de présentation. Si une telle perturbation existe, il peut s'ensuivre une baisse de performances dans la tâche de transfert.



Detable & Vinter 2006; Pacton, Perruchet, Fayol, & Cleeremans, 2001; Stone, Blumberg, Blair, & Cancelli, 2016; Thibaut & Witt, 2015).

Une série d'études a montré qu'une stratégie correctement transférée peut perdre de son efficacité dans la tâche de transfert, traduisant une baisse de performances au transfert. Celle-ci ne concerne que les scores propres à la tâche mais pas les scores stratégiques qui, eux, ne baissent pas de la tâche principale à la tâche de transfert (Clerc & Miller, 2013 ; Clerc et al., 2021). Ce pattern, appelé déficience d'utilisation due au transfert (transfer Utilization Deficiency ou t-UD) a été observé chez des enfants de 4 à 5 ans ayant transféré correctement, mais inefficacement, une stratégie d'attention sélective d'une première tâche de rappel de localisation d'items à deux tâches isomorphes (Clerc & Miller, 2013). Des résultats identiques ont été observés chez des enfants de 4 à 7 ans ayant transféré une stratégie mnésique (autorépétition ou groupement catégoriel) d'une tâche de rappel d'items visuels à une tâche isomorphe (Clerc et al., 2021). C'est également ce qui a été observé chez des enfants de 4 ans ayant transféré une stratégie d'appariement entre objets à comparer, d'une première tâche de jugement comparatif à une seconde, isomorphe (Clerc et al., 2017). Dans cette étude, les enfants de 4 ans ne sont pas parvenus à profiter du bénéfice d'une stratégie d'appariement entre les deux tâches de jugement comparatif utilisées, une tâche utilisant des jouets et une tâche utilisant de petits blocs en bois peints. Les auteurs expliquent ce résultat en termes de limite de développement conceptuel concernant les catégories. Les enfants de 4 ans sont en effet mis en difficulté avec la notion de catégorie, ce qui expliquerait leur échec. A cet âge, les enfants privilégient les propriétés perceptives des objets (le jouet en lui-même) par rapport à leurs propriétés relationnelles (les deux séries à comparer sont-elles identiques ou pas ?). Cette idée était déjà présente chez Wohlwill (1968) qui montrait que les enfants de 5 à 7 ans commettent plus d'erreurs de catégorisation dans une tâche présentée avec un matériel pictural, par rapport à une tâche verbale. Une autre explication avancée par Clerc et al. (2017) est celle du facteur

différentiel qui pourrait par exemple conduire certains enfants à être dans l'incapacité d'inhiber la réponse de type « identique » lorsqu'ils avaient à prononcer un jugement de comparaison entre deux séries d'items différentes : dans ce dernier cas, la réponse attendue était « différent ». Ceci est compatible avec le développement de l'inhibition dont un pic est observé à partir de 5 ans (Best & Miller, 2010). Clerc (2013) suggère d'ailleurs de considérer les facteurs différentiels dans l'explication et l'évaluation des déficiences d'utilisation stratégique.

Dans les cas où on observe une résolution de la tâche de transfert, le niveau de performances de la tâche de transfert reste tout de même fréquemment inférieur à celui de la tâche principale. En effet, « In experiments where positive evidence of transfer is reported, performance levels on the transfer situations are, as a rule, lower than performance levels on the original training situation. This so-called transfer decrement phenomenon raises a problem for a rule-based standpoint. » (Perruchet & Vinter, 2002, p. 318). Dans le cas de la grammaire artificielle par exemple, Pacton, Perruchet, Fayol, et Cleeremans (2001) ont montré que des enfants âgés de 6 à 10 ans ne parvenaient pas à transférer efficacement une règle de positionnement de consonnes, dans une tâche de non-mots comprenant des consonnes jamais doublées en Français. Les auteurs expliquent ces résultats par une sensibilité à l'identité des consonnes qui peuvent être doublées dans la langue française, et par le fait que cette sensibilité est plus prononcée chez les enfants de 6 et 7 ans, montrant par là une baisse de performances plus marquée chez ces enfants.

La baisse de performance au transfert pourrait s'expliquer par la charge cognitive. Du fait que la tâche de transfert nécessite une adaptation de la connaissance antérieure, cette adaptation engendre un effort cognitif. Celui-ci occasionne une charge cognitive pouvant être responsable d'un traitement moins efficace de la tâche de transfert, causant ainsi une baisse de performances lors du passage de la tâche principale à la tâche de transfert (Clerc et al., 2014). Les explications en lien avec ce phénomène portent d'une part, sur des causes

développementales et différentielles (Clerc, 2013). D'autre part, ces explications sont liées aux facteurs contextuels. Si les effets du niveau de développement sur la baisse de performances au transfert sont déjà observés dans la littérature (Clerc et al., 2017; Detable & Vinter, 2006; Pacton et al., 2001), ceux des facteurs contextuels et différentiels commencent seulement à être étudiés (Chang et al., 2019). Ce travail de thèse portera donc essentiellement sur l'effet de ces derniers facteurs sur la baisse de performances au transfert : concernant le contexte, il s'agit d'étudier les interfaces graphiques de présentation des tâches en 2D, considérées comme des contextes numériques d'apprentissage et de transfert (*cf.* chapitre 1) ; concernant les aspects différentiels, il s'agit d'investiguer la contribution des capacités individuelles d'inhibition, que nous analyserons en détail dans le prochain chapitre.

Dans le premier chapitre, nous avons vu que les outils numériques sont aujourd'hui utilisés pour apprendre. Replacés dans le cadre de la taxonomie de Barnett et Ceci (2002), les interfaces graphiques des outils numériques, et précisément des tablettes tactiles, peuvent être considérées comme des contextes d'apprentissage au même titre que les supports tangibles, les tâches étant présentées en 2D sur les outils numériques et en 3D via les supports tangibles. Néanmoins, s'il a été montré que les enfants peuvent apprendre sur une tablette numérique (Haßler, et al., 2016; Hirsh-Pasek et al., 2015), il convient de chercher à savoir s'ils sont capables de transférer les apprentissages à un autre contexte d'apprentissage, et si ce transfert s'accompagne d'une baisse de performance comme souvent dans le transfert tangible.

## **2.5. Supports numériques et transfert d'apprentissage**

Conformément au modèle de Klahr et Chen (2011), pour que le transfert d'un apprentissage d'une tâche numérique vers une tâche tangible soit possible chez l'enfant, il faut un certain degré de similarité entre la tâche numérique et la tâche tangible. Rappelons que nous utiliserons le vocable *transfert numérique* pour qualifier toute situation de transfert dans

laquelle au moins une des tâches est réalisée sur un outil numérique. On peut se demander si ce type de transfert peut être observé chez les enfants.

### **2.5.1. Possibilité d'un transfert numérique**

Les premières études pouvant être considérées comme testant le transfert numérique chez les jeunes enfants (0-3 ans) ont utilisé des vidéos pré-enregistrées, que l'enfant regarde ensuite sur une télévision ou sur un ordinateur (Barr, 2010; Barr, Zack, & Garcia, 2008; Hauf, Aschersleben, & Prinz, 2007; Hayne, Herbert, & Simcock, 2003; Skouteris, Spataro, & Lazaridis, 2006 ; Suddendorf, 2003). Dans ces études, les enfants ne pouvaient pas interagir avec ces supports d'apprentissage, l'absence d'interaction pouvant expliquer la baisse de performance au transfert numérique (voir Anderson & Pempek, 2005, pour une revue).

L'avènement des appareils numériques à écran tactile a permis d'améliorer les protocoles expérimentaux du transfert numérique. En 2009, Zack, Barr, Gerdhardstein, Dikerson, et Meltzoff ont introduit pour la première fois le numérique à écran tactile dans un protocole expérimental voué à l'étude du transfert numérique chez de jeunes enfants. Les auteurs ont ainsi apporté une rupture avec le protocole d'étude du transfert numérique de type « 2D vers 3D » qui prévalait jusque-là, en ajoutant de nouvelles situations expérimentales, du numérique vers le numérique (2D/2D), du tangible vers le numérique (3D/2D) et du tangible vers le tangible (3D/3D). Quatre groupes d'enfants de 15 à 16 mois étaient constitués et ce, selon les quatre conditions expérimentales (3D/3D; 2D/2D; 2D/3D; 3D/2D). Parmi ces quatre conditions, deux étaient caractérisées par une similarité des supports de présentation des deux tâches (2D/2D et 3D/3D), les deux autres relevant d'une dis-similarité des supports de présentation des deux tâches (2D/3D et 3D/2D). La tâche consistait à appuyer sur un bouton placé sur un jouet (vache) en version numérique (écran tactile) ou en version tangible. Les résultats ont révélé que les scores d'imitation des enfants en conditions 3D/3D et 2D/2D (conditions « intégrées ») étaient meilleurs que ceux des enfants en conditions 2D/3D et 3D/2D

(conditions « croisées »). Il n'y avait pas de différence entre les deux conditions intégrées, ni entre les deux conditions croisées. Cette étude a permis de montrer l'existence d'un transfert numérique chez des enfants plus jeunes que dans les études précédentes (voir Barr, 2010, pour une revue), attribuable à la possibilité offerte aux enfants d'interagir avec l'outil numérique utilisé. Elle a également permis de montrer la supériorité des conditions intégrées sur les conditions croisées, et par là-même le rôle joué par la similarité des supports de présentation des tâches. Le support de présentation des tâches est un élément contextuel (Barnett & Ceci, 2002), les résultats obtenus ici étant compatibles avec les prévisions du modèle de Klahr et Chen (2011) sur le rôle facilitateur des similarités de contexte dans le transfert. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, la possibilité d'interagir avec le support numérique semble ainsi favoriser l'apprentissage (Haßler et al., 2016; Hirsh-Pasek et al., 2015) et probablement le transfert numérique. La difficulté des jeunes enfants à apprendre sur le support numérique ne serait pas donc tant liée à l'écran lui-même, qu'à l'impossibilité de s'engager dans une interaction avec l'écran (Lovato & Waxman, 2016). Les jeunes enfants (24 à 30 mois) sont par exemple capables d'identifier des objets tangibles par leurs noms lorsque, bien avant, ils ont été en situation d'interaction contingente avec un écran pour apprendre les noms de ces objets (Kirkorian, et al., 2016).

Chez des enfants légèrement plus âgés, on observe également une réussite du transfert numérique dans des situations de *near transfer*. L'étude de Aladé et al. (2016) a montré que des enfants de 5 ans étaient plus performants à la tâche de transfert lorsque celle-ci appartenait au même domaine de connaissance que la tâche principale. La tâche principale consistait à mesurer la taille d'une girafe à l'aide des objets du quotidien (e.g., chaussure), que les enfants devaient superposer pour déterminer la taille de la girafe. La tâche de transfert appartenant au même contexte que la tâche principale consistait à mesurer un canard, car les deux objets à mesurer appartiennent à la même catégorie : les animaux. Puis, une autre tâche consistait à mesurer un

robot, tâche contextuellement non similaire à la tâche principale, car les deux objets à mesurer n'appartiennent pas à la même catégorie. Les enfants se sont montrés moins performants à la tâche « robot » comparativement aux deux autres tâches, dans lesquelles les performances sont par ailleurs équivalentes. Le changement de stimulus semble donc avoir fait baisser les performances des enfants. Les auteurs soutiennent que lorsqu'il y a une distance contextuelle entre les tâches numériques, les enfants consacrent une partie importante de leurs ressources à la manipulation de l'écran tactile (la « tâche d'utilisation de la tablette », cf. Amadieu et Tricot, 2014) pendant la réalisation de la tâche (la « tâche d'apprentissage », cf. Amadieu et Tricot, 2014), allouant ainsi une faible quantité de ressources à la réalisation de la tâche d'apprentissage, ici mesurer un objet : le transfert est alors peu efficace. En revanche, lorsque le contexte de la tâche de transfert est très similaire au contexte de la tâche principale, les enfants réussissent à transférer l'apprentissage (le concept général de mesure) efficacement, car ils sont capables de reproduire l'action physique qu'ils ont appris dans la tâche principale.

En grandissant, les enfants pourraient apprendre aussi bien sur des supports numériques que sur des supports tangibles, mais la réussite du transfert d'apprentissage entre supports de présentation tangibles vs numériques reste controversée en résolution de problèmes.

### **2.5.2. Controverse en résolution de problèmes dans le transfert numérique**

Les études de Schiff et Vakil (2015) et de Huber et al. (2016) sont éclairantes sur cette controverse. Pour cette raison, ce point sera consacré à la présentation de ces deux études. Dans l'étude de Schiff et Vakil (2015), le nombre de mouvements nécessaire pour effectuer la tâche de Tour de Hanoï augmentait, entre deux variantes de cette tâche, chez les enfants de 8 ans. A l'aide d'un ordinateur, la première variante consistait à déplacer trois disques empilés du plus grand au plus petit d'une première tige à une troisième tige de gauche à droite en passant par une tige intermédiaire, et la deuxième variante consistait cette fois à déplacer les disques de la troisième tige à la première tige de droite à gauche. L'expérience se déroulait en deux jours. Le

premier jour, les enfants devaient résoudre la première variante (tige gauche vers tige droite) au cours de dix essais consécutifs. Le second jour, ils réalisaient encore la première variante au cours de trois essais, totalisant ainsi treize essais. Les enfants résolvaient alors la seconde variante (tige droite vers tige gauche) au cours d'un seul essai, ce quatorzième essai étant considéré comme la phase de transfert. Les résultats ont montré une amélioration des performances du premier au treizième essai, les enfants effectuant la tâche, au fil des essais, avec de moins en moins de mouvements. Cependant le nombre de mouvements nécessaire pour résoudre la tâche ré-augmentait au quatorzième essai, attestant d'une baisse de performances lors du passage de la tâche principale (première variante) à la tâche de transfert (seconde variante). Les auteurs expliquent ce résultat par une fatigue cognitive liée au traitement successif de plusieurs représentations mentales et plusieurs informations. De ce point de vue, on peut supposer que si on réduit le nombre d'essais, les enfants seraient capables d'un transfert plus efficace entre deux versions de la Tour de Hanoï.

Huber et al. (2016) ont montré en revanche que des enfants de 6 ans sont capables de transférer la procédure de résolution de la tour de Hanoï numérique en 2D, vers une version tangible en 3D, le transfert se traduisant, selon les auteurs, par une augmentation de performances. Deux groupes étaient constitués pour résoudre la Tour de Hanoï au cours de quatre essais consécutifs. Durant les trois premiers essais, un groupe apprenait à résoudre la Tour de Hanoï en 2D sur une tablette numérique, et un autre groupe apprenait à résoudre la version tangible en 3D. Au quatrième et dernier essai, les deux groupes résolvaient la version tangible en 3D : les deux groupes résolvaient alors la tâche en 3D avec un nombre de mouvements équivalent, mais inférieur à celui du premier essai. Les auteurs concluent à l'existence d'un transfert d'apprentissage chez les enfants ayant bénéficié d'abord de la présentation 2D (trois premiers essais) puis de la présentation 3D (quatrième essai). Ils soutiennent que l'interactivité avec l'écran tactile a permis aux enfants d'apprendre activement

à résoudre la tâche dans les premiers essais, comme c'est le cas par ailleurs avec la version tangible. Pour cette raison, le changement de support n'aurait pas affecté les performances. Cependant, bien que les supports de présentation des tâches, et donc leurs contextes de présentation, variaient (numérique vs tangible), la tâche principale et la tâche de transfert étaient identiques (Tour de Hanoï à trois disques). Or, comme nous l'avons rappelé dans les paragraphes ci-dessus, le transfert d'apprentissage ne consiste pas à réaliser deux tâches identiques, mais bien deux tâches présentant un minimum de différences. Le seul changement, contextuel, du support de présentation ne constitue pas une telle différence, et considérer ce protocole comme testant le transfert d'apprentissage est contestable. On peut en effet se demander si les enfants ayant bénéficié de la présentation 2D puis 3D ont transféré leur apprentissage d'une tâche à une autre, ou ont seulement répété une séquence de mouvements quatre fois dans des tâches qui étaient rigoureusement identiques à l'exception de leurs supports de présentation. En d'autres termes, un apprentissage effectué sur support numérique peut-il être considéré comme authentiquement « transféré » par des enfants dans un support tangible, dès lors que la tâche elle-même est rigoureusement identique, même si le contexte varie ? Ce travail de thèse se propose de répondre à cette question en répliquant cette étude, mais en faisant varier la forme des empilables afin que les tâches principale et de transfert ne soient pas strictement identiques. Par ailleurs, la controverse des performances à la Tour de Hanoï peut-elle être liée à la tâche elle-même ?

## **2.7. La Tour de Hanoï**

### **2.7.1. Considérations préliminaires**

« Imaginez la situation suivante : vous avez devant vous 24 pièces, dont vous savez que l'une est fautive et plus lourde que les autres. Vous devez identifier cette pièce. Pour cela, vous disposez d'une balance à deux plateaux sans poids. Comment procédez-vous pour y parvenir en faisant le moins de pesées possible ? Facile pensez-vous ? Vous identifiez la fautive pièce en

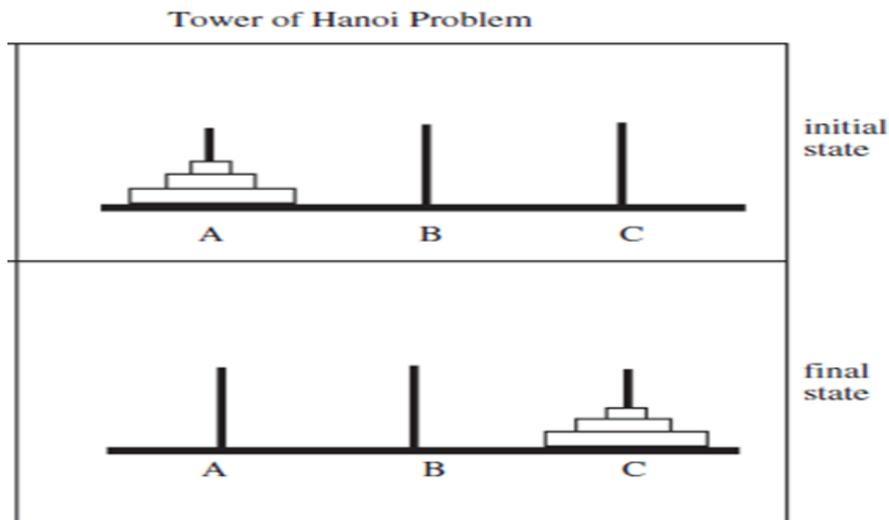
quatre pesées. Et si on vous dit que trois pesées sont suffisantes pour identifier cette fausse pièce, il va falloir y réfléchir un peu plus. Ainsi, cette situation constitue une situation problème. » (Léger, 2016, p. 165). Présentée ainsi, cette situation peut se révéler problématique pour un individu, s'il s'aperçoit qu'il ne dispose d'aucune connaissance à appliquer systématiquement à cette situation. Il doit alors construire de nouvelles connaissances en fonction des contraintes de la situation. Un problème fait donc référence à toute situation pour laquelle nous ne disposons d'aucune réponse ou connaissance a priori pour atteindre le but qu'on s'est fixé (Oléron, 1963, cité par Léger, 2016).

Nous faisons face à des situations problèmes au quotidien, car les situations auxquelles nous sommes confrontés chaque jour imposent en général de trouver des solutions nouvelles pour s'y adapter. Les problèmes peuvent être classés selon deux points de vue : selon l'information délivrée par l'énoncé du problème, et selon les habiletés cognitives mises en jeu (Léger, 2016). Cette thèse portera sur le deuxième type de problèmes : les problèmes de transformation. Les problèmes dits de transformation consistent à trouver la procédure d'actions qui transforme une situation initiale en situation finale déterminée dans l'énoncé, en employant uniquement les actions autorisées : c'est le cas du problème de la Tour de Hanoï.

### **2.7.2. Le problème dit de la Tour de Hanoï**

La Tour de Hanoï est l'une des tâches les plus utilisées en psychologie cognitive pour étudier le processus de planification (Richard, 1982). Elle est constituée de trois tiges : A, B, C. Sur la tige A, sont empilés du bas vers le haut  $n$  éléments (les empilables) du plus grand au plus petit. La tâche consiste à déplacer les  $n$  éléments empilés sur la tige A vers la tige C en se servant de B si nécessaire. Chez l'enfant, la version utilisée est celle à trois empilables, généralement des disques : un grand, un moyen et un petit. Pour résoudre la Tour de Hanoï, l'enfant doit agir sur l'état initial (les trois disques sur A) pour atteindre l'état final (les trois disques sur C), en passant par des états intermédiaires (*cf.* Figure 7). Pour cela, l'enfant doit

utiliser les opérateurs, qui sont des actions permises par l'énoncé : ne déplacer qu'un disque à la fois ; ne mettre un disque que sur un disque plus grand ou sur une tige vide. Ceci a pour but de transformer l'état actuel du problème afin de parvenir à l'état final (Léger, 2016). En effet, la notion d'état se traduit par une situation du problème à un moment précis. Il y a donc un état initial (situation de départ), des états transitoires et un état final (but) (Newell & Simon, 1972).



**Figure 7.** Etats de résolution du problème de la Tour de Hanoï, tirée de Zanga, Richard, et Tijus (2004).

Selon le modèle General Problem Solver (GPS) de Newell et Simon (1972), la résolution du problème suit un ensemble d'étapes :

étape 1 : elle consiste en la formation d'un espace problème, c'est-à-dire la représentation que l'individu se fait de la tâche. L'espace problème est construit sur la base de deux éléments : l'interprétation que l'individu se fait de l'état initial, de l'état final et des différentes contraintes (règles à respecter) ; la récupération, en MLT, des indices pertinents pour la tâche à réaliser (des traits communs à une tâche déjà réalisée antérieurement).

étape 2 : l'individu doit sélectionner un opérateur qui lui permette de réduire la distance entre l'état initial et l'état final. Il doit construire la représentation qui permettra d'identifier les différents états à atteindre à l'aide des opérateurs légaux afin de passer de l'état

initial à l'état final : c'est l'espace de la tâche. Si l'individu ne parvient pas à trouver l'opérateur approprié, il utilisera une heuristique.

étape 3 : l'individu doit appliquer l'opérateur sélectionné. Ceci conduit à un nouvel état du problème qui peut être l'état final ou qui permet de s'en rapprocher.

étape 4 : elle consiste en une évaluation de l'état actuel du problème qui aboutit à deux situations possibles. Dans la première, l'individu a résolu le problème ou pense l'avoir résolu. Dans ce cas, le processus de résolution prend fin. Dans la seconde situation, le problème n'est pas encore résolu, ce qui amène l'individu à reprendre l'étape 1 ou 2 pour opérer d'autres transformations et se rapprocher de l'état final ou l'atteindre (Léger, 2016).

Dans ce modèle, tous les états possibles de l'espace de la tâche peuvent être construits à l'avance. C'est précisément le cas du problème de la Tour de Hanoï.

Simon (1975) a proposé une stratégie permettant de définir l'espace de la tâche de la Tour de Hanoï, la stratégie récursive.

*La stratégie récursive.* Elle consiste à utiliser la récursion pour résoudre un problème, c'est-à-dire diviser un problème en une succession de sous-problèmes de même nature. Cette stratégie permet une résolution optimale de la Tour de Hanoï, c'est-à-dire une résolution en un minimum de déplacements des empilables. Il s'agit de décomposer la grande pyramide en des sous-pyramides. Soit  $n$  le nombre de disques, la stratégie récursive consiste à en déplacer  $n-1$  de A vers B (sans le plus gros disque). On aura alors en B une nouvelle pyramide avec  $n-1$  disques. Selon Simon (1975), la pyramide de disques peut être déplacée de A à C selon les trois étapes suivantes : (1) mis-à-part le plus grand disque, le reste des disques de la pyramide est déplacé de A vers B ; (2) le plus grand disque est déplacé de A vers C ; (3) la pyramide présente sur B est déplacée vers C. Autrement dit, on déplace  $n-1$  disques de A vers B, puis le grand disque est déplacé vers C. On reprend les déplacements à  $n-1$  disques jusqu'à ce qu'on arrive à une pyramide à un seul disque et par là, à un seul mouvement légal. Simon (1975) soutient que

seule la deuxième étape correspond à un déplacement légal, c'est-à-dire un déplacement autorisé par les règles. Pour lui, la première étape, qui consiste à libérer A de  $n-1$  disques pour déplacer le gros disque vers C, et la troisième étape qui consiste à amener les disques restants de B en C, sont elles-mêmes des problèmes de Tour de Hanoi, caractérisées par le fait qu'elles comportent un disque de moins par rapport au problème initial ( $n-1$ ). Ces deux étapes (1 et 3) peuvent donc être traitées en les décomposant elles-mêmes en les trois mêmes étapes que celles appliquées au problème d'ensemble, car l'emplacement du plus grand disque n'impose aucune contrainte aux mouvements des disques plus petits. Avec une Tour de Hanoi à trois disques, la stratégie récursive sera appliquée comme suit (Simon, 1975) :

- 1) But : déplacer la pyramide à 3 disques de A à C
- 2) Objectif : déplacer la pyramide à 2 disques de A à B
- 3)\* Déplacer le disque 1 de A à C
- 4)\* Déplacer le disque 2 de A à B
- 5)\* Déplacer le disque 1 de C à B
- 6)\* Déplacer le disque 3 de A à C
- 7) Objectif : déplacer la pyramide à 2 disques de B à C
- 8)\* Déplacer le disque 1 de B à A
- 9)\* Déplacer le disque 2 de B à C
- 10)\* Déplacer le disque 1 de A à C.

Les astérisques (\*) renvoient aux mouvements légaux.

Pour Simon (1975), bien que seuls les mouvements de disques individuels (\*) soient considérés comme des mouvements légaux, et bien que les pyramides ne puissent être déplacées que disque par disque, l'individu peut néanmoins se représenter les objectifs et le but final. Ainsi, dans la séquence de résolution de la Tour de Hanoi à trois disques, il y a sept mouvements et trois étapes supplémentaires de fixation d'objectifs. Simon (1975) soutient par ailleurs que pour qu'un individu puisse utiliser cette stratégie récursive, il doit être capable de se représenter mentalement les objectifs, mais aussi de les maintenir en mémoire à court terme pendant qu'il

atteint les sous-objectifs. Ceci implique également de bonnes capacités de planification, ce qui peut rendre cette stratégie difficile à appliquer pour les enfants de moins de 7 ans (voir Henry & Bettenay, 2010, pour une revue). Pour résoudre la Tour de Hanoi, les jeunes enfants, qui ne maîtrisent pas encore la planification, peuvent avoir recours à la stratégie perceptive.

*La stratégie perceptive.* Elle consiste à placer d'abord le plus grand disque sur la tige C, puis le grand disque suivant, et ainsi de suite sans pour autant respecter les étapes de la stratégie réursive. Dans ce cas, pour Simon (1975), le déplacement d'un disque ne se fait que sous deux conditions : 1) il n'y a pas de petits disques sur A (tige initiale), et 2) il n'y a pas de petits disques sur C (tige but). Par conséquent, le déplacement d'un disque particulier, soit k, vers une tige cible, soit x, peut être effectué : (a) en déplaçant selon les règles tout disque plus petit que k hors de C ; (b) en répétant l'étape (a) jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de disques plus petits que k sur C ; (c) en déplaçant le disque k de A vers C. Puis on reprend le même cycle pour les autres disques (Simon, 1975). L'avantage d'une telle stratégie pour l'enfant est qu'il trouve la solution au fur et à mesure qu'il utilise les opérateurs et ceci, en fonction de l'état du problème. C'est donc après perception d'un état du problème qu'il choisit l'opérateur. Si tel est le cas, l'espace problème, c'est-à-dire, la représentation que l'individu se fait de la tâche à réaliser, mérite donc une attention particulière.

### ***2.7.2.1. Le modèle des contraintes***

Un modèle qui accorde une place centrale à la représentation que l'individu se fait de la tâche est le modèle des contraintes de Richard, Poitrenaud, et Tijus (1993). Ces derniers cherchent à comprendre à quel moment les individus, au cours de la réalisation de la tâche, effectuent un mouvement que commande la tâche (espace de la tâche) ou un mouvement qu'ils jugent eux-mêmes pertinent (espace du problème). Les hypothèses du modèle sont que les changements d'espaces améliorent la compréhension de l'énoncé du problème et permettent également une meilleure planification. Cette approche de la résolution de problème s'intéresse

au rôle des interprétations restrictives et à la façon dont leurs effets sont modélisés en présence des contraintes implicites, en l'occurrence les mouvements que l'individu s'interdit lui-même d'effectuer. La représentation du problème serait ainsi fonction de l'ensemble des contraintes que l'individu s'impose. La particularité d'un tel modèle réside dans le fait qu'il ne considère pas la planification comme une anticipation des mouvements mais comme une découverte progressive de la solution, étant donné que les mouvements légaux se découvrent en supprimant les contraintes implicites. En effet, lorsque l'individu se trouve dans une situation d'impasse, il est amené à effectuer un mouvement auto-proscrit. C'est en effectuant ce mouvement qu'il découvre que celui-ci est autorisé par les règles, et qu'il est par conséquent légal.

Dans ce modèle, l'effet d'une contrainte est représenté par une partition en deux sous-ensembles de mouvements : les mouvements conformes à la contrainte, et les mouvements non conformes donc exclus par celle-ci. Deux types de contraintes existent, selon les algorithmes "SI (état ou objectif : le disque 1 est sur C) NE PAS (actions : déplacer 2 vers C)" (contrainte négative) ; et "SI (état actuel : le disque 2 est sur B) FAIRE (actions : mettre le disque 1 sur le 2)" (contrainte positive). Ces deux types de contraintes sont dynamiques, car la suppression d'une d'entre elles entraîne la découverte d'un mouvement.

Selon Richard et al. (1993), la résolution d'un problème comme celui de la Tour de Hanoï suit un ensemble d'étapes :

étape 1 : il y a un contrôle pour s'assurer que l'action projetée est cohérente avec les contraintes et peut permettre d'atteindre l'objectif en cours. Si une telle action est disponible, elle est exécutée;

étape 2 : seules les contraintes sont prises en compte pour décider de ce qu'il faut faire. Lorsque l'individu ne parvient pas à atteindre l'objectif en cours, il cherche ce qui peut être fait. Il retourne à l'étape 1 et s'il est dans une situation d'impasse, il passe à l'étape 3;

étape 3 : L'individu décide que le problème est insoluble, mais parce qu'il est encouragé par l'expérimentateur à résoudre le problème, il pense qu'il faut faire quelque chose même si cela nécessite la violation d'une contrainte. Ainsi, la dernière contrainte de la liste est temporairement ignorée. Ensuite, le processus est relancé à l'étape 1.

Le modèle de Newell et Simon (1972) et celui de Richard et al. (1993) apparaissent comme deux approches complémentaires. Tous deux décrivent comment, au cours de la résolution d'un problème, les individus identifient les états à atteindre en utilisant des opérateurs légaux et se construisent une représentation du problème. Si pour Newell et Simon (1972) la résolution du problème passe essentiellement par l'identification des opérateurs légaux pour réduire la distance entre l'état initial et l'état final, Richard et al (1993) soutiennent que ce sont les contraintes que se fixe l'individu qui lui permettent de découvrir les opérateurs légaux. Ces deux modèles mettent donc en jeu un espace de la tâche et un espace problème, deux espaces dont la mise en relation augmente la probabilité de résoudre un problème, y compris chez les enfants.

#### ***2.7.2.2. Tour de Hanoï et transfert numérique***

Compte-tenu de la controverse, rappelée ci-dessus, autour des transferts impliquant des versions numériques et tangibles de la Tour de Hanoï chez l'enfant, nous souhaitons poursuivre l'étude de la capacité des enfants à effectuer le transfert entre différentes versions de la Tour de Hanoï. Il nous semble pertinent de replacer cette question dans le cadre de l'utilisation des tablettes numériques et de leur potentiel pédagogique (Haßer et al., 2016; Tricot, 2020). De plus, du fait que l'interface graphique d'une tablette numérique peut être considérée comme un contexte d'apprentissage au sens de Barnett et Ceci (2002) et en l'occurrence un contexte numérique d'apprentissage et de transfert, la tablette numérique peut apparaître comme un moyen pour tester le modèle de Klahr et Chen (2011) en dissociant la tâche elle-même de son support de présentation. Ceci permettra de dissocier le facteur « similarité des tâches » (Tour

de Hanoï à trois disques vs Tour de Hanoï à trois carrés) du facteur « similarité des contextes » (support numérique vs tangible de présentation de la tâche), souvent confondus dans les études du transfert d'apprentissage entre différentes versions de la Tour de Hanoï.

En outre, si la dis-similarité de surface entre deux tâches rend difficile le transfert numérique chez les enfants, ce qui est conforme à la littérature sur le transfert tangible (Cauzinille-Marmèche, 1990; Klahr & Chen, 2011; Reed, 2012), il convient de chercher à en comprendre précisément les raisons. Une des explications évoquées dans la littérature sur le transfert est le rôle délétère des éléments de surface qui interfèrent sur le transfert d'apprentissage. Dans ce sens, certains chercheurs supposent une implication de l'inhibition dans la survenue du transfert d'apprentissage, car celle-ci assure le contrôle des interférences (Clerc et al., 2014). Pour cela, le chapitre suivant sera consacré à la présentation de l'inhibition et à l'analyse de sa potentielle contribution au transfert numérique.

---

## **CHAPITRE 3 : RÔLE DE L'INHIBITION DANS LE DÉVELOPPEMENT COGNITIF ET LES APPRENTISSAGES CHEZ L'ENFANT**

---

Dans ce chapitre, nous verrons l'importance de l'inhibition, notamment le contrôle de l'interférence, dans les apprentissages et le transfert numérique chez l'enfant. Nous nous appuyerons pour cela sur une description du développement de l'inhibition dans l'enfance.

### **3.1. Généralités**

L'inhibition fait partie intégrante d'un ensemble de processus rassemblés sous le terme-parapluie de « Fonctions Exécutives » (FE). Les FE sont un ensemble de processus cognitifs de haut niveau qui permettent à un individu de contrôler et réguler ses pensées, ses comportements et ses émotions devant des situations nouvelles ou non-routinières (Miyake & Friedman, 2012). Elles permettent à tout un chacun de se contrôler lorsque le but poursuivi est incompatible avec un fonctionnement cognitif de type automatique (Diamond, 2013; Miyake, Friedman, Emerson, Witzki, & Howerter, 2000). Elles sont reconnues pour leur implication dans le raisonnement et la résolution des problèmes (Diamond, 2013; Hendry, Jones, & Charman, 2016). Lorsque les processus automatisés sont inefficaces, les FE se révèlent essentielles à l'adaptation de l'individu à son environnement. Elles permettent de réfléchir avant d'agir, de résister aux tentations ou aux réactions impulsives, de rester concentré, de raisonner, de résoudre des problèmes, de s'adapter avec souplesse à des demandes ou des priorités changeantes, et de voir les choses sous des angles nouveaux et différents (Diamond & Ling, 2016). Du point de vue neuroanatomique, les FE sont sous-tendues par des réseaux cérébraux du cortex préfrontal (Diamond & Ling, 2016). Elles peuvent être envisagées comme un ensemble de processus efficaces pour orienter nos ressources cognitives vers un but précis.

Selon Diamond (2013), les FE sont impliquées dans plusieurs activités du quotidien. Des liens ont été montrés à de nombreuses reprises avec la réussite scolaire (Ahmed, Tang,

Waters, & Davis-Kean, 2019; Best, Miller, & Naglieri, 2011; St-Clair-Thompson & Gathercole, 2006; Willoughby, Kupersmidt, & Voegler-Lee, 2012). Elles sont par exemple impliquées dans l'apprentissage de la lecture et des mathématiques (Diamond & Ling, 2016). Elles sont également prédictives d'une bonne santé mentale et physique (Diamond, 2013 ; Diamond & Ling, 2016). Depuis deux décennies, de nombreux travaux sur les FE ont permis d'étudier leur structure.

### **3.2. Le caractère unitaire et dissociable des FE**

Pour mesurer les fonctions exécutives, les chercheurs ont recours à de nombreuses tâches. Cette diversité témoigne d'un problème de « pureté » de ces tâches, dans la mesure où le score dérivé d'une tâche inclut nécessairement une variance systématique, attribuable à des processus non-exécutifs (e.g., le traitement des couleurs ou la vitesse d'articulation dans la tâche strop, cf. Miyake & Friedman, 2012). De ce point de vue, selon le processus non-exécutif impliqué dans la tâche, les scores attribuables aux performances exécutives peuvent varier. Pour combler cette lacune, certains chercheurs ont proposé une approche fondée sur les variables latentes (Miyake & Friedman, 2012; Miyake et al., 2000). Cette approche consiste à sélectionner un ensemble de tâches similaires, c'est-à-dire qui partagent peu de variance systématique non-exécutive. Ceci permettrait d'extraire ce qui est commun à ces tâches, à l'aide de techniques statistiques multivariées de type analyse factorielle et modélisation en équation structurale, puis d'utiliser la variable latente qui en résulte comme mesure de la FE (Miyake & Friedman, 2012). Cette mesure serait ainsi plus pure, c'est-à-dire moins entachée de processus cognitifs ne relevant pas de la FE considérée. La question de la structure des FE est ainsi posée : forment-elles un tout unitaire ou sont-elles dissociables ?

L'une des études de la structure des FE devenue classique est celle de Miyake et al. (2000). Les auteurs ont cherché à identifier un potentiel processus sous-jacent au contrôle permis par les fonctions exécutives. Pendant deux semaines, ils ont soumis de façon

individuelle, 137 étudiants à neuf tâches (*Plus–minus task*, *Number–letter task*, *Local–global task*, *Keep track task*, *Tone monitoring task*, *Letter memory task*, *Antisaccade task*, *Stop-signal task*, *Stroop task*), pour évaluer les trois fonctions exécutives dites fondamentales (*foundational*) : flexibilité (*shifting*), mise à jour en mémoire de travail (*updating*) et inhibition. Les résultats montrent que les tâches qui évaluent la même fonction sont fortement corrélées entre elles, par exemple *Plus–minus task*, *Number–letter task*, *Local–global task* pour la flexibilité, *Keep track task*, *Tone monitoring task*, *Letter memory task* pour la mise à jour en mémoire de travail, et *Antisaccade*, *Stop-signal task*, *Stroop task* pour l'inhibition. Lorsqu'ils ont établi un modèle à trois facteurs réduits, suggérant l'indépendance des trois fonctions les unes des autres, le modèle obtenu n'était que partiellement ajusté aux données. Les auteurs en ont conclu que chaque FE contribue à un niveau précis à la performance dans la tâche exécutive. En revanche, ces trois FE semblent liées par un facteur commun. Garon, Bryson et Smith (2008) soutiennent que les fonctions exécutives seraient contrôlées par un même processus attentionnel général, en même temps qu'elles sont dissociables selon des domaines spécifiques. Le rôle central du contrôle attentionnel dans le contrôle exécutif avait déjà été évoqué par Anderson (2002), qui lui attribuait une fonction intégrative, car il favorise la régulation de la flexibilité cognitive, la définition du but et le traitement de l'information, tous processus à la base du contrôle exécutif.

Selon Miyake et al. (2000) le modèle à trois facteurs n'est pas généralisable à toutes les populations, en particulier les enfants et les personnes âgées. Une étude réalisée auprès d'enfants de 3 ans a montré qu'à cet âge, la structure des FE est plutôt unitaire, le modèle le plus pertinent pour expliquer les données était un modèle à un facteur (Wiebe et al., 2011). Ce résultat est confirmé par l'étude de Fujisawa, Todo et Ando (2017), qui ont montré que les FE sont représentées par un facteur unique chez des enfants âgés de 36 et 48 mois. De même, Miller, Giesbrecht, Müller, McInerney, et Kerns (2012) ont mené une étude auprès d'enfants âgés de 3 à 5 ans. La même structure des FE à un facteur a également été observée. Néanmoins,

lorsque des indicateurs de performances supplémentaires étaient inclus dans l'analyse pour mesurer distinctement les facteurs de mémoire de travail, de flexibilité et d'inhibition, un modèle à deux facteurs, composé de la mémoire de travail et de l'inhibition, était le plus pertinent pour expliquer les données. Les auteurs soutiennent que la structure des FE chez les enfants d'âge préscolaire est influencée par la sélection des tâches et des indicateurs de performances. Les mêmes résultats sont obtenus par Usai, Viterbori, Traverso, et De Franchis (2014). Dans leur étude menée auprès d'enfants de 5 et 6 ans, le meilleur ajustement aux données était un modèle à deux facteurs, dans lequel l'inhibition était distinguée tandis que la mémoire de travail et la flexibilité apparaissaient comme une composante unitaire.

Bien que le modèle à trois facteurs ait été répliqué chez des enfants de 8 à 13 ans (Duan, Wei, Wang, & Shi, 2010), cette structure ne fait pas consensus dans la littérature, notamment dans cette frange de la population. Pour étudier le développement de la structure des FE de l'enfance à l'adolescence, Xu et al. (2013) ont conduit une étude auprès de 457 enfants âgés de 7 à 15 ans, au cours de laquelle ces derniers étaient soumis à une batterie de tâches mesurant les trois FE fondamentales. Les résultats indiquent que, globalement, le modèle qui rend compte des données avec le meilleur ajustement est le modèle à trois facteurs. Néanmoins, une analyse factorielle confirmatoire menée auprès de chaque groupe a révélé que chez les enfants de 7 à 9 ans, c'est le modèle à un facteur qui explique le mieux les données. Le résultat est le même pour les enfants de 10 à 12 ans. En revanche, pour les enfants de 13 à 15 ans, seul le modèle à trois facteurs s'ajuste convenablement aux données. Les auteurs concluent que la structure des FE se modifie au cours du développement, leur différenciation n'intervenant que lors de l'entrée dans l'adolescence. Cette différenciation progressive proviendrait non seulement d'un rythme de développement différent de chacune des trois FE (Fujisawa et al., 2017), mais aussi des tâches et des indicateurs de performances utilisés.

En clair, le développement de la structure des FE correspond à un modèle dans lequel les FE semble initialement très indifférenciées, puis elles émergent comme des fonctions de plus en plus autonomes et spécifiques à un domaine donné : c'est le cas du contrôle inhibiteur, qui est spécifiquement impliqué dans le blocage des réponses prédominantes.

### **3.3. Contrôle inhibiteur : inhibition des réponses prédominantes**

Combien de fois avons-nous entendu une personne dire à son ami : « Tu n'aurais pas dû agir précipitamment. Tu n'as pas été sage » ? Cette situation suppose qu'avant d'agir, de poser un acte, nous devons être capable de nous contrôler, de retenir nos actions ou paroles, pour fournir des réponses plus appropriées aux problèmes que nous rencontrons. Ceci est permis par le contrôle inhibiteur. Celui-ci est impliqué dans le contrôle de l'attention, du comportement, des pensées et/ou des émotions de l'individu. L'inhibition désigne « la capacité à retenir de façon délibérée une réponse prépondérante, activée, dominante, saillante, automatique, surprise, ou en cours (*ongoing response*), et le contrôle de l'interférence » (Monette & Bigras, 2008, p. 324).

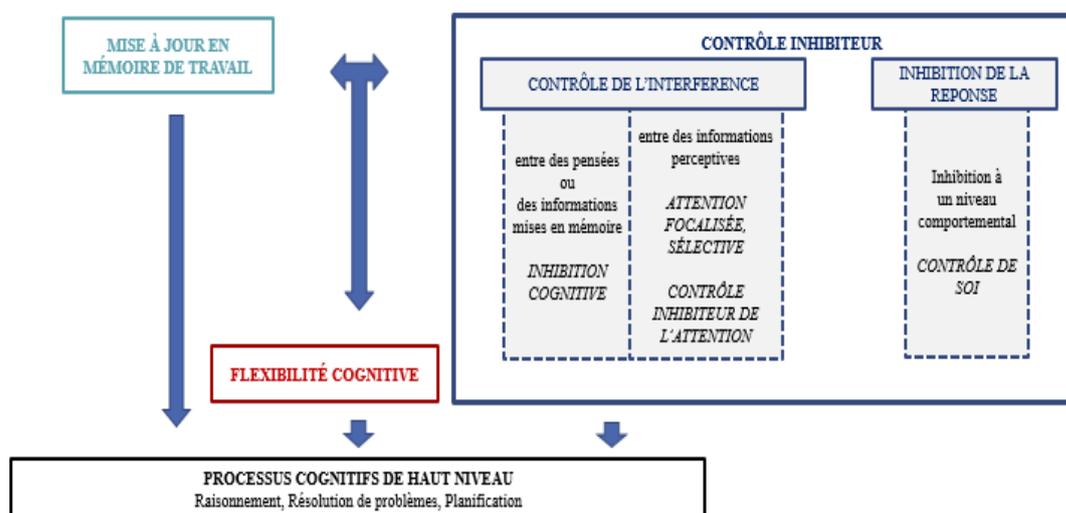
L'inhibition apparaît vers 6 mois, son développement se fait progressivement dans l'enfance jusqu'à l'adolescence et à l'âge adulte (Best, Miller, & Jones, 2009). Dans cette perspective, nous nous intéressons particulièrement au rôle de l'inhibition dans le développement et les apprentissages chez l'enfant. Le modèle de Diamond (2013) et celui de Houdé (2015) seront un appui au cours de cette analyse.

### **3.4. Contrôle inhibiteur et développement**

#### **3.4.1. Modèle de Diamond (2013)**

En 2013, Diamond publie un article dans lequel elle décrit les fonctions exécutives et leur développement. Pour mieux comprendre les relations que les FE entretiennent entre elles, l'auteure élabore un modèle (*cf.* Figure 8). Celui-ci place le contrôle inhibiteur au cœur des FE,

car cette composante exécutive est essentielle pour le développement de l'activité des autres FE (Hendry et al., 2016). Lorsque nous apprenons, nous construisons des schémas de connaissances. Les individus étant confronté continuellement aux mêmes situations, les schémas s'automatisent et deviennent par conséquent des habitudes, dans l'objectif de simplifier nos actions dans l'environnement. Ces habitudes ne sont néanmoins pertinentes que pour des tâches routinières et des situations connues. Lorsqu'une habitude est inappropriée à une situation donnée, il faut se retenir d'y recourir. De même, il faut parfois résister aux distracteurs quand nous résolvons une nouvelle tâche. L'individu qui inhibe a conscience du but à atteindre, tout comme il a une volonté manifeste de contrôler ses comportements inappropriés pour la situation du moment. Ainsi, le contrôle inhibiteur nous permet de ne pas agir sous le coup de l'émotion de manière impulsive et inappropriée. Sans lui, nous serions sujets aux impulsions, prisonniers d'anciennes habitudes de pensée ou d'action (réponses conditionnées), et/ou de stimuli saillants dans l'environnement qui nous poussent à produire des réponses inadéquates. Il nous permet en quelque sorte d'être des créatures réfléchies (Diamond, 2013). De plus, le contrôle inhibiteur a deux composantes : l'inhibition de la réponse et le contrôle de l'interférence.



**Figure 8.** Le contrôle inhibiteur intégré aux autres fonctions exécutives selon Diamond (2013), adapté par Linzarini (2017).

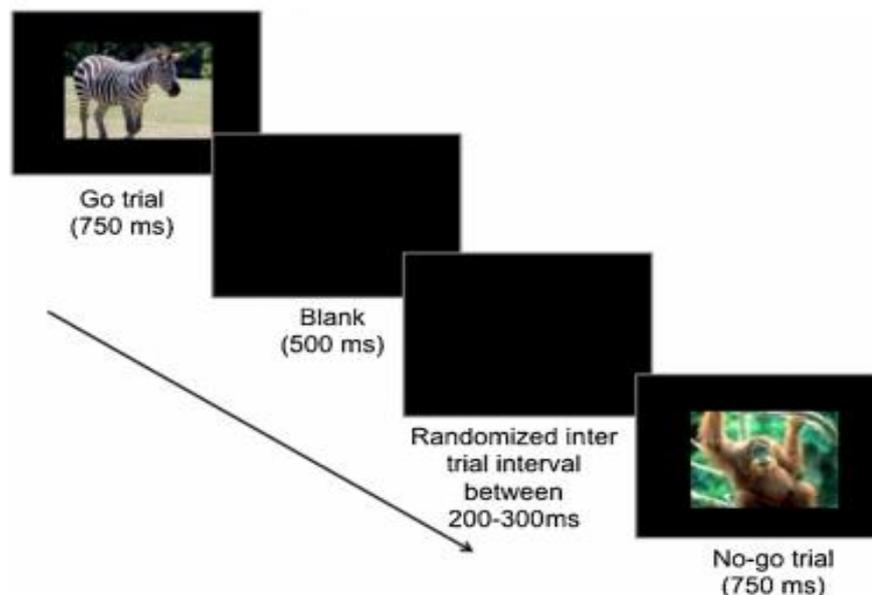
### ***3.4.1.1. L'inhibition de la réponse***

Dans le modèle de Diamond (2013), l'inhibition de la réponse correspond au contrôle de notre comportement et de nos émotions. Au cours de la réalisation d'une tâche, l'inhibition permet de résister délibérément à une réponse automatique, dominante ou activée, jugée non-pertinente (Friedman & Miyake, 2004). On l'observe dans la classique tâche A non B créée par Piaget (1937) pour étudier le concept de permanence de l'objet. Dans cette tâche, un expérimentateur place un objet derrière un cache (A) plusieurs fois sous les yeux de l'enfant, qui va à chaque fois le chercher et le retrouver derrière le cache A. Puis, l'expérimentateur déplace l'objet du cache A et le place, sous les yeux de l'enfant, derrière un second cache (B). On constate que jusqu'à la fin de la première année, les bébés continuent à chercher un objet derrière A lorsque celui-ci est maintenant caché derrière B. Piaget explique ce résultat par une absence du concept de permanence de l'objet, c'est-à-dire que le bébé ne sait pas que l'objet continue d'exister même lorsqu'il est hors de sa vue ou de sa portée. Partant des études empiriques relatives au rôle du cortex préfrontal dans le comportement moteur, Houdé (1995) propose une autre explication de l'erreur A non B. Pour lui, avant la fin de la première année, l'enfant a déjà élaboré une permanence, car dès 5 mois il conçoit la transgression des propriétés d'un objet et son unité. Dans ce sens, l'erreur A non B ne peut s'expliquer par une absence de permanence de l'objet, mais plutôt par une persévération de l'acte moteur fréquemment répété dans la recherche de l'objet vers le cache A, qui ne peut être inhibé en raison de l'immaturation du cortex préfrontal du bébé.

C'est également ce qu'on observe dans le paradigme Go/No-Go (*cf.* Figure 9). Dans ce paradigme, l'enfant doit répondre le plus rapidement possible en pressant sur un bouton à l'apparition d'un stimulus fréquemment présenté (75%) (e.g., attraper les animaux en train de courir, essai « Go »), et en ne pressant pas sur le bouton à l'apparition d'un autre stimulus moins fréquent (25%) (e.g., l'orang-outan, ami du gardien du Zoo, essai « No-Go »). L'enfant doit

donc éviter de répondre au stimulus orang-outan, ce qui revient à inhiber sa tendance motrice automatisée lors de l'apparition fréquente des animaux. En effet, chez l'enfant, les essais Go impliquent une attention soutenue, alors que l'inhibition de la réponse comportementale est impliquée dans les essais No-Go (St. John, Finch, & Tarullo, 2019). De plus, lorsqu'il n'y a pas de contraintes temporelles, les enfants font preuve d'une plus grande précision lors des essais de type "Go" que lors des essais de type "No-go", preuve que les réponses des enfants sont automatisées et qu'ils éprouvent des difficultés à les retenir lorsqu'ils doivent répondre systématiquement, c'est-à-dire sans processus de contrôle (Rahman, Carroll, Espy, & Wiebe, 2017).

Une autre facette de l'inhibition consiste à ignorer un stimulus distracteur. Un stimulus inapproprié peut en effet perturber la réalisation d'une tâche, c'est ce qui se passe lorsque le stimulus est saillant : il faut alors le maintenir à distance et résister aux interférences qu'il peut occasionner. Selon Diamond (2013), le contrôle de l'interférence se traduit en particulier par le contrôle inhibiteur de l'attention.

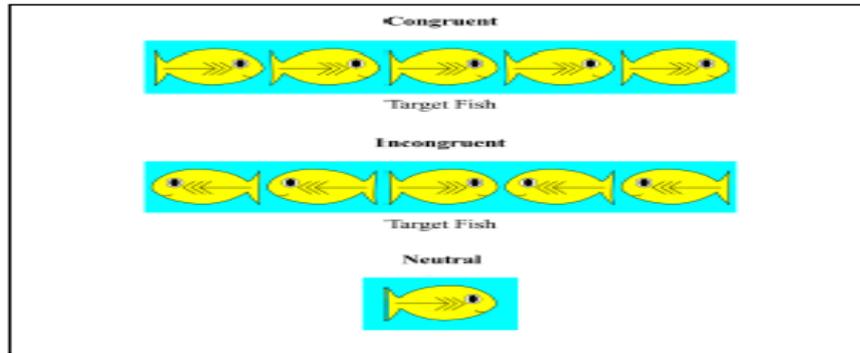


**Figure 9.** Exemple d'une tâche de Go/NoGo, tiré de St. John, Finch, & Tarullo (2019).

### 3.4.1.2. *Le contrôle des interférences*

#### 3.4.1.2.1. **Le contrôle inhibiteur de l'attention**

Le contrôle inhibiteur de l'attention consiste à résister aux sources d'informations externes jugées non pertinentes pour la réalisation de la tâche. Il nécessite de maintenir son attention sur la tâche plutôt que sur les éléments qui l'environnent (attention focalisée), tout en ignorant ces éléments qui environnent la tâche et qui ne sont pas nécessaires, voire néfastes, à son exécution (attention sélective). C'est ce qui se passe quand un enseignant corrige un devoir truffé de coquilles et de fautes. Il doit, en effet, ignorer ces coquilles pour comprendre ce que l'étudiant veut dire dans son texte. Pour évaluer cette capacité, on a par exemple recours au paradigme de la *Flanker Task* (cf. Figure 10). Dans ce paradigme, un stimulus cible apparaît soit seul sur un écran (condition neutre), soit aligné avec d'autres stimuli (e.g., le poisson du milieu dans une rangée de cinq poissons) : dans ce dernier cas (présence des *flankers*), le stimulus cible est placé dans une rangée orientée vers la gauche ou vers la droite. Dans la condition congruente, tous les stimuli sont dirigés dans la même direction ( $\rightarrow\rightarrow\rightarrow\rightarrow\rightarrow$  ou  $\leftarrow\leftarrow\leftarrow\leftarrow\leftarrow$ ), tandis que dans la condition incongruente le stimulus cible est dirigé dans la direction opposée aux autres ( $\rightarrow\rightarrow\leftarrow\rightarrow\rightarrow$  ou  $\leftarrow\leftarrow\rightarrow\leftarrow\leftarrow$ ). La tâche consiste à réaliser une action concernant le stimulus cible en appuyant sur un bouton (e.g., nourrir un poisson affamé : la cible). Yoshida, Tran, Benitez, et Kuwabara (2011) ont montré, grâce à ce paradigme, que chez l'enfant de 3 ans le contrôle inhibiteur de l'attention est impliqué dans l'apprentissage d'une langue. Par ailleurs, la seconde facette du contrôle de l'interférence est l'inhibition cognitive.



**Figure 10.** Exemple de Flankers, tiré de Yoshida, Tran, Benitez et Kuwabara (2011).

### 3.4.1.2.2. L'inhibition cognitive

Quand on réalise une tâche, il est essentiel d'éviter, voire de supprimer, toute information qui pourrait gêner la mémoire de travail dans son activité : c'est ce que le modèle de Diamond (2013) considère comme étant l'inhibition cognitive. Celle-ci consiste à résister à l'interférence proactive, c'est-à-dire à l'intrusion, en mémoire de travail, d'une information qui n'est plus appropriée pour la tâche mais qui gêne la réalisation de celle-ci en consommant inutilement une partie des ressources cognitives disponibles (Friedman & Miyake, 2004). Il s'agit donc pour l'individu de maintenir à distance de la mémoire de travail, une information importune qui peut interférer avec les opérations courantes (Nigg, 2000).

La tâche Stroop (1935) illustre cette capacité à résister aux interférences internes, dont l'interférence proactive. Dans cette tâche, le participant doit nommer la couleur de l'encre dans laquelle est écrit le nom d'une couleur, et non le nom de cette dernière. Le mot est traité plus vite lorsqu'il est écrit avec l'encre dont il désigne la couleur (e.g., BLEU écrit avec l'encre bleue : condition congruente), que lorsqu'il est écrit dans une encre différente (e.g., le mot BLEU écrit avec l'encre rouge : condition incongruente). Dans le dernier cas, le processus en compétition (lecture du mot vs dénomination de la couleur de l'encre), doit être supprimé pour pouvoir nommer la couleur de l'encre. Cette tâche est difficile parce que le participant doit résister à la réponse provoquée par l'automatisme de la lecture du mot qui entrave la

dénomination de la couleur de l'encre (Augustinova & Ferrand, 2014; Diamond, 2013; Nigg, 2000). De plus, parce que le test de Stroop nécessite de bonnes compétences en lecture, il ne peut être administré aux enfants d'âge préscolaire qui sont encore non-lecteurs : l'épreuve a donc donné lieu à diverses adaptations pour les enfants (Catale & Meulemans, 2009; Gerstadt, Hong, & Diamond, 1994; Wright, Waterman, Prescott, & Murdoch-Eaton, 2003). Dans une étude auprès d'enfants de 5 à 12 ans et de jeunes adultes de 21 ans, Ikeda, Okuzumi, et Kokubun (2013) ont par exemple adapté le Stroop classique en Stroop taille de l'image de l'animal (« *Stroop Pictorial Animal Size task* »). Dans cette tâche, on présente aux participants des images d'animaux dans une taille qui ne correspond pas à leur taille dans la réalité (e.g., un éléphant présenté en petite taille et une souris présentée en grande taille). On demande ensuite aux participants d'indiquer la taille de l'image, et par conséquent d'inhiber la taille réelle de l'animal, non pertinente pour la tâche. Les résultats de Ikeda et al. (2013) ont montré une interférence plus marquée chez les enfants de 5 à 6 ans que chez les enfants de 7 à 8 ans, chez qui elle était plus marquée par rapport aux enfants âgés. Nous reviendrons plus en détail sur cette étude plus tard dans notre analyse. De plus, il n'y avait aucune interférence chez les jeunes adultes, chez qui l'on retrouve pourtant une interférence dans le Stroop classique mot-couleur. L'interférence provoque donc des demandes inhibitrices imposées par la tâche (Best & Miller, 2010), comme c'est le cas entre le test Stroop Mot-Couleur chez l'adulte et le Stroop taille de l'image de l'animal chez l'enfant.

L'inhibition cognitive permet d'expliquer le développement de certaines compétences comme la catégorisation, le nombre (Houdé, 2000 ; Houdé & Borst, 2015). Les travaux de ces auteurs ont donné lieu à un modèle qui propose un dépassement de la classique théorie constructiviste de Piaget (1937).

### 3.4.2. Modèle de Houdé (2000)

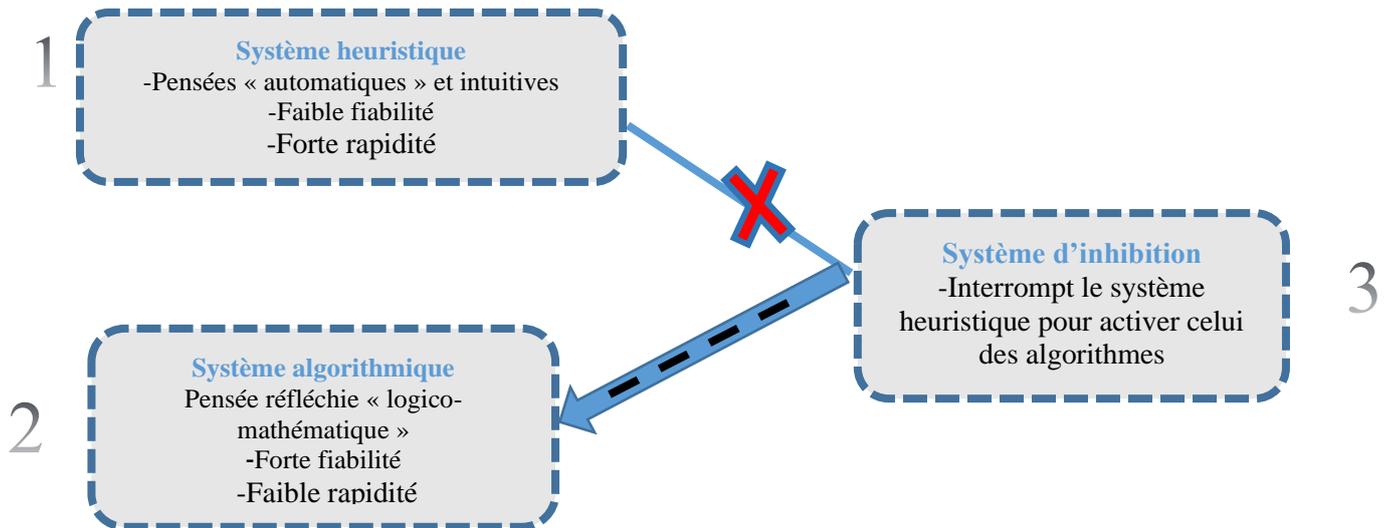
Le modèle de Houdé (2000) s'est construit sur les limites de la théorie constructiviste de Piaget (1937). Cette théorie accorde à la notion de structures une place fondamentale dans le développement cognitif. Elle postule que les connaissances s'acquièrent avec l'âge selon des phases de développement qualifiées de stades, et caractérisées par une structure qui contient et dépasse la précédente (structuration majorante). Dans cette théorie, le développement cognitif est considéré comme linéaire et cumulatif. Il s'agit d'un modèle « en escalier » puisque lorsqu'une structure logique est acquise, elle est conservée tout au long du développement (Borst et al., 2015).

Pour illustrer l'apport du modèle de Houdé par rapport à la théorie piagétienne, prenons l'exemple des compétences numériques du bébé, que Piaget (1937) a, semble-t-il, sous-estimées. Par exemple, dès 5 mois, les bébés sont déjà capables d'opérations arithmétiques simples. Pour tester ces compétences, Wynn (1992) a mesuré le temps de fixation sur des événements possibles ou impossibles chez les enfants de 5 mois, dans un paradigme de transgression des attentes. Dans le cas d'une addition, deux événements sont présentés aux enfants : événement possible ( $1+1=2$ ) et événement impossible ( $1+1=1$ ). Le bébé voit un mickey sur une petite scène, puis un écran se lève et cache le mickey tandis qu'un expérimentateur dépose visiblement un autre mickey derrière l'écran et retire sa main vide sous les yeux de l'enfant. Ensuite l'écran descend et, soit deux mickeys apparaissent sur la scène (événement possible), soit un seul mickey apparaît sur la scène (événement impossible). Les enfants fixent plus longtemps l'événement impossible, ce qui suppose que parce que les enfants ont mentalement additionné le mickey rajouté par l'expérimentateur au mickey déjà présent sur la scène, ils s'attendent à retrouver deux mickeys sur la scène et non un seul, ce qui explique leur étonnement devant l'événement impossible. Le modèle en escalier de Piaget ne fournit pas d'explications sur le développement précoce de cette compétence numérique chez le bébé,

comme d'autres compétences. Il ne permet pas non plus d'expliquer certaines erreurs tardives chez les adultes.

Le modèle de Houdé a permis de réinterpréter certaines données expérimentales rapportées par Piaget, en invoquant le rôle central de l'inhibition dans le développement cognitif. Par exemple, l'erreur A non B commise par de nombreux bébés jusque vers la fin de la première année, y est interprétée comme un défaut d'inhibition motrice du geste dirigé vers A en raison de la maturation insuffisante du cortex préfrontal, plutôt qu'en terme d'absence du concept de permanence de l'objet du fait d'une immaturité cognitive (Houdé, 2017). Pour répondre aux limites du modèle piagétien, Houdé (1997, 2000) et ses collaborateurs proposent un modèle du développement cognitif (*cf.* Figure 11) dans lequel ils attribuent un rôle clé au processus d'inhibition (Borst, Aïte, & Houdé, 2015; Houdé & Borst, 2015). Pour Houdé (2000), le développement cognitif ne peut se réduire à la simple coordination-activation d'unités structurelles comme proposé par Piaget (1937). En effet, l'enfant doit aussi apprendre à inhiber les stratégies de résolution de problèmes ou connaissances automatisées au fil des expériences. Une structure logique peut se mettre en place à un stade donné du développement et ne plus s'exprimer plus tard (Borst, Poirel, Pineau, Cassoti, & Houdé 2013; Houdé, 1997; Houdé & Borst, 2014). C'est par exemple le cas des enfants de plus de 7 ans qui sont censés avoir déjà acquis la logique des classes, mais qui échouent encore à la tâche d'inclusion de classes de Piaget modifiée par Markman (1978). Un tas de fleurs composé de marguerites et de roses est posé devant l'enfant et un tas supplémentaire, composé uniquement de marguerites, est ensuite posé à côté du premier. Les enfants doivent dire s'il est possible de faire quelque chose pour avoir plus de marguerites que de fleurs. Dans l'étude de Markman (1978) les enfants répondaient qu'il faut ajouter des marguerites pour qu'il y ait plus de marguerites que de fleurs, et ceci jusque 11 ans. Cet échec tardif suppose donc que bien qu'elle soit déjà présente chez ces enfants, la logique des classes n'a pas pu s'exprimer.

Houdé et Borst (Houdé, 2000 ; Houdé & Borst, 2015) se sont basés sur le système duel heuristique/algorithmique (Kahneman & Tversky, 1974) et ont ajouté une troisième composante, en l'occurrence un système d'inhibition (*cf.* Figure 11) pour rendre compte de tels échecs.



**Figure 11.** Modèle de Houdé et Borst (2015).

#### **3.4.2.1. Le système heuristique**

Une heuristique est une stratégie générale, requise pour les situations habituelles mais qui n'est pas basée sur un raisonnement logique. Il s'agit d'une forme de raisonnement quotidien que les individus utilisent pour atteindre leurs objectifs et résoudre des tâches, sans se référer à une logique plus rationnelle (Houdé, 2000). Le système 1 est dit « heuristique », car il opère sur une pensée intuitive, automatique, et nécessite peu d'efforts cognitifs. Il peut rapidement conduire à la réponse (*cf.* Figure 11). L'heuristique a l'avantage d'être plus rapide et cognitivement moins coûteuse. Elle est néanmoins d'une fiabilité relative du fait qu'elle conduit parfois à une réponse erronée, qu'il convient d'éviter en faisant appel à une pensée algorithmique. Celle-ci est plus appropriée plutôt que le raisonnement par heuristique quand les réponses habituelles et automatiques sont inadéquates à la tâche rencontrée.

### ***3.4.2.2. Le système algorithmique***

À l'inverse du système heuristique, le système algorithmique opère sur une pensée plus contrôlée, plus lente et réfléchie. Parce qu'il fait appel à une pensée logico-mathématique, il nécessite un effort cognitif important, ce qui n'est pas le cas de l'heuristique (Houdé & Borst, 2015; Houdé, 2000). Contrairement à l'heuristique, l'algorithme est plus fiable. À condition que la règle algorithmique soit bien appliquée, elle permet d'aboutir à une réponse correcte (cf. Figure 11). Par exemple, dans les tâches piagésiennes, les enfants échouent parce qu'ils confondent longueur et nombre (épreuves de conservation), classe d'ensemble et classe subordonnée (épreuves d'inclusion de classe). Ces erreurs proviendraient d'une tendance à concentrer davantage leur attention sur des facteurs non pertinents, au détriment des plus pertinents : le système 1 est activé au désavantage du système 2 (Houdé, 2000). C'est ce qui se passe dans la résolution de problème. Les enfants se focalisent sur l'état but et s'empressent de l'atteindre en faisant des actions qui perceptivement peuvent réduire l'écart entre le but et l'état initial. Ces actions peuvent non seulement être erronées, mais peuvent faire perdre de vue aux enfants les règles. Or, résoudre un problème nécessite une compréhension des relations entre les éléments du problème et une formulation d'hypothèses, ainsi qu'une planification des actions à accomplir selon les règles du problème. C'est donc raisonner par déduction. Ainsi, pour enrayer la tendance à recourir aux stratégies heuristiques, l'enfant doit pouvoir bloquer le système 1 afin d'activer le système 2 (Houdé, 2017). C'est dans cet élan que Houdé et Borst (2015) suggèrent un troisième système qui permet de surmonter ces erreurs en inhibant ces formes de pensée intuitives.

### ***3.4.2.3. Le système d'inhibition***

Que l'on soit bébé, enfant, adolescent ou adulte, nous commettons parfois des erreurs systématiques dans les tâches logiques (Houdé, 2000). Ces erreurs se produisent souvent lorsque nous puisons dans notre répertoire de stratégies, des réponses heuristiques qui peuvent

être trompeuses. La capacité à surmonter ces erreurs est directement liée à la capacité à inhiber ces formes de pensées intuitives (Houdé & Borst, 2014, 2015). Ainsi, en fonction de la tâche à réaliser, l'heuristique et l'algorithme s'expriment différemment et rentrent parfois en concurrence (Houdé, 2000). Lorsque c'est nécessaire, l'inhibition peut permettre d'arbitrer ce conflit en bloquant le système heuristique afin de laisser s'exprimer le système algorithmique (Houdé, 2017). Ce cadre théorique entrevoit la capacité progressive du cortex préfrontal à inhiber des stratégies non pertinentes ou trompeuses, à mesure du développement cortical. Ceci a pour objectif d'activer la stratégie la plus logique, acquise à un stade de développement de l'enfant tel qu'envisagé par Piaget (Houdé et Borst, 2014).

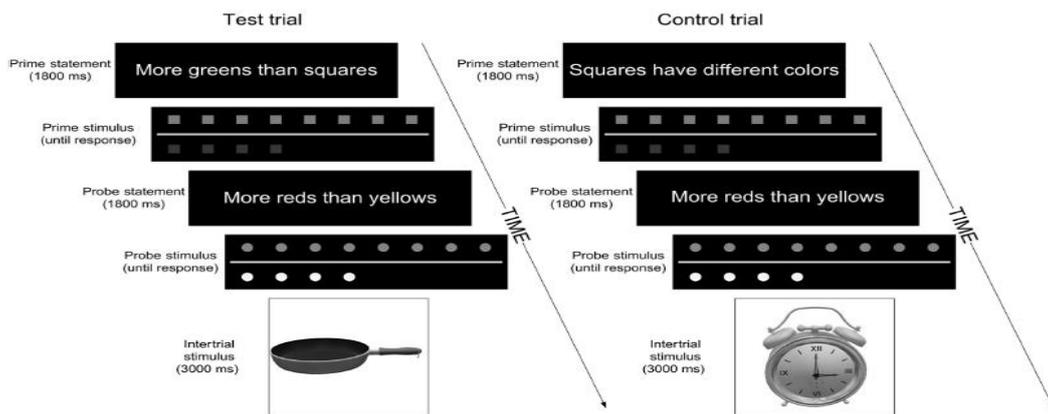
Dans une étude sur l'efficacité du contrôle inhibiteur dans une tâche piagétienne de conservation du nombre, Houdé et Guichart (2001) ont montré que les enfants de 9 ans ont besoin d'inhiber l'heuristique perceptive (longueur = nombre) pour réaliser correctement la tâche. Utilisant un paradigme d'amorçage négatif, la tâche consistait à juger du nombre d'items alignés horizontalement et présents dans deux rangées séparées par un trait central. Deux situations étaient présentées aux participants. Une situation incongruente dans laquelle les deux rangées comprenaient le même nombre d'items (4) et ne différaient que par la longueur (la longueur ne covarie pas avec le nombre). L'enfant devait donc inhiber l'heuristique perceptive (longueur = nombre), pour fournir la réponse correcte (même nombre) ; Une situation congruente dans laquelle les deux rangées n'avaient pas le même nombre d'items et différaient aussi par la longueur (2 vs 3, la longueur covariait avec le nombre). Dans la condition test, la situation incongruente était présentée en premier lieu, suivie de la situation congruente. Dans la condition contrôle la situation congruente était présentée avant la situation incongruente. Le temps de réaction était mesuré en situation congruente dans la condition test et dans la condition contrôle. Les résultats ont montré que les enfants mettaient plus de temps dans la condition test par rapport à la condition contrôle. Les auteurs concluent que dans la condition test,

l'heuristique perceptive a été inhibée en situation incongruente, car les enfants ont mis du temps à l'activer ensuite dans la situation congruente. C'est le coût de la levée de l'inhibition, mise en place précédemment dans la situation incongruente, qui expliquerait la différence de temps de réaction entre les conditions test et contrôle pour la situation congruente.

Le paradigme d'amorçage négatif a été utilisé dans plusieurs autres études, permettant de confirmer les prédictions du modèle. Dans l'une d'elles, on a demandé à des enfants de 10 ans et des jeunes adultes de 20 ans d'infirmier ou de confirmer le plus rapidement possible l'affirmation (*Prime/Probe statement*) qui suivait chaque item visuel (*Prime/Probe stimulus*, cf. Figure 12) : Borst et al. (2013) observent également un effet d'amorçage négatif dans cette tâche de catégorisation. La tâche consistait à présenter sur un écran des énoncés (*stimuli*) et le participant devait décider si l'affirmation concernant cet énoncé était vraie ou fausse. Deux types d'essais étaient utilisés : essais test et essais contrôle. Dans les essais test, l'amorce (*prime*) était un item d'inclusion de classe (e.g., l'énoncé "Plus de carrés que de verts" était présenté, suivi d'une image de huit carrés verts et de quatre carrés bleus), et l'examen (*probe*) était un item de comparaison de sous-classes (e.g., l'énoncé "Plus de rouges que de jaunes" était présenté, suivi d'une image de huit cercles rouges et de quatre cercles jaunes). Dans les essais contrôle, l'amorce était un item de contrôle (e.g., l'énoncé "Les carrés ont la même couleur" était présenté, suivi d'une image de huit carrés verts et de quatre carrés bleus), et l'examen était un item de comparaison de sous-classes identique à celui de l'essai test. Le temps mis à l'examen dans les essais test et contrôle était comparé. Les résultats indiquent que tous les participants mettent significativement plus de temps dans les essais test que dans les essais contrôle. Cette différence de temps de réaction s'explique par un effet d'amorçage négatif, ce dernier engendrant une nécessaire levée de l'inhibition exercée lors de la présentation de l'amorce (e.g., présentation de l'énoncé "Plus de carrés que de verts", suivi d'une image de huit carrés verts et de quatre carrés bleus). Néanmoins, les jeunes adultes mettent significativement

moins de temps que les enfants, montrant par-là que la capacité à lever l'inhibition augmente avec l'âge.

À partir de là, résoudre un problème ce n'est plus seulement être capable de trouver une solution, mais c'est aussi être capable d'éviter les pièges contenus dans les problèmes, d'inhiber le système heuristique pour activer le système algorithmique.



**Figure 12.** Exemple du paradigme d'amorçage négatif dans une tâche de catégorisation, tiré de Borst, Poirel, Pineau, Cassoti, et Houdé (2013).

À différents âges, il est donc nécessaire d'inhiber les pensées intuitives pour résoudre les tâches logiques. Sachant que les adultes ont déjà acquis toutes les compétences logiques au sens de Piaget, les erreurs qu'ils accumulent dans les tâches logiques peuvent donc être attribuées à un défaut d'inhibition. Le développement cognitif ne serait donc pas linéaire et cumulatif. En même temps que les compétences de l'enfant et de l'adulte se construisent, elles sont susceptibles à tout moment de se heurter, de s'affronter, de se concurrencer. Il devient donc nécessaire de recourir à un mécanisme de blocage : l'inhibition (Houdé, 2000). Mais, comment se développe-t-il ?

### **3.5. Développement du contrôle inhibiteur**

Les enfants sont exposés à de nombreux stimuli de leur environnement. Ils ont besoin de l'explorer et de le découvrir pour mieux le comprendre et y agir. Les stimuli auxquels les enfants sont exposés peuvent constituer des distracteurs, responsables du partage de l'attention lors de la réalisation d'une tâche. Pour résoudre les problèmes rencontrés dans son environnement, l'enfant doit alors inhiber les distracteurs qui s'y trouvent. Comment parvient-il à le faire ? Il convient d'évaluer l'inhibition pour mieux comprendre son développement.

Pour évaluer l'inhibition, les chercheurs ont recours à plusieurs tâches, généralement regroupées en tâches de contrôle de comportement prédominant, et de tâches conflictuelles qui mettent en jeu l'activation d'une réponse latente en conflit avec une réponse dominante. Ainsi, l'intensité de l'activité inhibitrice varie selon les exigences de la tâche (Garon et al., 2008). Il existe communément deux ensembles de réponses dont le contrôle rend compte du développement de l'inhibition. Le premier ensemble est relatif aux réponses liées au comportement moteur (il s'agit pour un individu de contrôler ses émotions, par exemple chez l'enfant avec la tâche de récompense différée (*delay of gratification task*), dont le contrôle survient entre 0 et 3 ans). Le deuxième ensemble de réponses renvoie à l'activité cognitive dont le contrôle survient à partir de 4 ans et se poursuit jusqu'à l'âge adulte, dans la mesure où les réponses impliquent des compétences langagières (il s'agit alors de retenir une réponse prépondérante, de résister à des distracteurs pouvant perturber la réalisation d'une tâche, comme c'est le cas pour les tâches de type *Stroop*).

#### **3.5.1. Le contrôle inhibiteur de 0 à 3 ans**

Les premiers signes du développement de l'inhibition sont l'apparition du contrôle de la pensée consciente vers 4 mois (Houdé, 2017). À l'aide du paradigme expérimental de transgression des attentes chez des bébés de 4-5 mois, Baillargeon, Spelke et Wasserman (1985) ont montré que les bébés sont surpris par un événement physique impossible, qui contredit le

concept de permanence de l'objet. La tâche consiste à placer un gros bloc de bois devant le bébé. Celui-ci regarde attentivement le bloc de bois, puis on place verticalement entre le bébé et le bloc une planche de bois de sorte que la planche fasse écran et cache complètement le bloc. Le dispositif expérimental était créé pour que la planche se penche vers le bloc, ceci pour qu'elle arrête sa rotation lorsqu'elle atteint le bloc : c'est l'évènement physique possible et cognitivement attendu. Il y avait deux conditions dont l'une présentant cet évènement physique possible et attendu. Dans l'autre condition, par trucage, la planche continue de tourner en dépit de la présence du bloc de bois, ce qui constitue un évènement physique impossible et cognitivement inattendu. Les enfants regardent plus longtemps l'évènement impossible, surpris de voir la planche tourner alors que le bloc de bois est censé l'arrêter : ce serait la preuve que l'enfant a conscience que le bloc de bois continue d'exister derrière la planche. Les auteurs concluent qu'à cet âge, le bébé semble donc avoir acquis le concept de permanence de l'objet. Contrairement à ce que pensait Piaget (1967), l'échec des enfants à la tâche A non B avant 1 an ne serait donc pas dû à une absence de la permanence de l'objet, mais à une persévérance motrice (*cf.* plus haut), (Houdé, 1995). Ainsi, la réussite de la tâche A non B à 1 an s'expliquerait par l'acquisition de l'inhibition de la réponse comportementale (Diamond, 1990; Houdé, 2000, 2017; Zelazo & Müller, 2002).

Bien qu'à 1 an les enfants soient déjà capables de contrôler leur comportement moteur, il faut attendre l'âge de 3 ans pour les voir inhiber leurs comportements dans des tâches impliquant des émotions. Dans une étude utilisant le paradigme « Moins c'est Plus » (*More is Less*), Carlson, Davis, et Leach (2005) ont montré que les enfants de 3 ans ne parvenaient pas à inhiber leur tendance à choisir le plateau qui contenait beaucoup de friandises, bien qu'une récompense plus importante leur fût promise s'ils s'abstenaient de le faire et choisissaient le plateau en contenant moins. Ceci n'était pas le cas des enfants de 4 ans qui, eux, parvenaient à contrôler leur comportement devant le plateau rempli de friandises. Dans une deuxième étude,

les auteures ont remplacé les friandises par des points dessinés sur papier. Les enfants de 3 ans performaient mieux dans cette tâche que dans la tâche avec des friandises, choisissant plus souvent le plateau comportant le moins de points. Carlson et al. (2005) concluent que la présentation des friandises aux enfants provoque l'activation des réponses émotionnelles chez ces derniers, qui ne peuvent pas résister à la tentation de choisir le plateau contenant le plus de friandises. Les symboles (points) quant à eux, permettent une distanciation psychologique avec le stimulus, fonctionnant comme des éléments neutres ne permettant pas d'activer les réponses émotionnelles des enfants. On distingue en effet l'inhibition chaude et l'inhibition froide. La première est impliquée dans les situations où une charge émotionnelle importante est présente (comme c'est le cas avec les friandises chez les enfants). L'inhibition froide quant à elle intervient dans une situation de production d'une réponse dans un contexte sans charge affective (comme c'est cas avec les symboles) (Aïte et al., 2018; Zamora, Vernucci, del Valle, Introzzi, & Richard's, 2020).

Les jeunes enfants éprouvent des difficultés à inhiber leurs réponses émotionnelles. Ceci s'explique par un développement tardif des capacités d'inhibition chaude (Aïte et al., 2018; Blackemore, 2018; Prencipe et al., 2011). Chez les jeunes enfants, il est ainsi préférable d'utiliser des tâches d'inhibition froide comportant des symboles (e.g., des jetons, des blocs de bois), plutôt que des stimuli comportant un contenu émotionnel (e.g., bonbons, figurines). Néanmoins, les symboles abstraits impliquent la mémoire de travail, pour maintenir actives à la fois l'association symbole-référent et les règles applicables à la tâche (Carlson et al., 2005). C'est par exemple le cas dans des tâches de résolution de problèmes telle que la Tour de Hanoï, dans laquelle il faut empiler des pièces en bois suivant certaines règles. Il faut alors attendre que l'inhibition se développe davantage.

### 3.5.2. Le contrôle inhibiteur chez l'enfant de 4-5 ans : un pic de développement

L'évaluation de l'inhibition peut porter sur le type de réponses que commande une tâche. En effet, la différence entre plusieurs tâches d'inhibition se trouve dans le type de réponse sollicitée. Par exemple dans la *statue task* (tâche de statue), l'enfant doit rester sur une position sans bouger pendant un certain temps pour bénéficier d'une récompense. Les enfants de 3 et 4 ans réussissent majoritairement cette tâche, mais échouent à la tâche *day and night*. Cette dernière consiste à demander au participant de produire une réponse contre-intuitive. On présente au participant une image de la lune et il doit dire « jour » et lorsqu'on lui présente une image de soleil, il doit dire « nuit ». Ces deux tâches n'impliquent pas les mêmes habiletés, la première nécessitant des habiletés motrices, et la seconde des habiletés langagières. La difficulté pour les enfants de moins de 5 ans à réaliser la tâche *day and night* serait due à la réponse verbale que commande cette tâche. En revanche, moins difficile à réaliser, la *statue task* commande plutôt un contrôle moteur, permettant une réussite dès 3 ans (Best & Miller, 2010).

Dans une étude, Simpson et Riggs (2005) administrent deux tâches de type Stroop à des enfants de 3<sup>1/2</sup> ans et 5 ans : *day and night* et *white and black* (l'enfant devait dire « noir » lorsqu'on lui présentait un carré blanc et inversement). Les résultats montrent que les enfants de 3<sup>1/2</sup> ans font plus d'erreurs que les enfants de 5 ans, attestant que l'inhibition verbale se développe à 5 ans. Au fil de l'étude, ces tâches Stroop sont administrées à des enfants plus âgés jusqu'à 11 ans. Les enfants s'améliorent considérablement entre 3<sup>1/2</sup> ans et 5 ans, et montrent ainsi un pic de développement de l'inhibition dans ces tranches d'âges. Ces résultats trouvent écho dans la littérature (Best & Miller, 2009, 2010 ; Garon et al., 2008 ; Hendry et al., 2016). Wiebe, Sheffield, et Espy (2012) ont également montré à l'aide d'un paradigme go/no-go, qu'entre 3 et 5 ans la précision des réponses augmente. Les enfants de 3 ans manifestaient un conflit vitesse-exactitude, observable dans un ralentissement des réponses concomitante à une

amélioration de la précision de celles-ci. Ainsi, pour fournir une réponse appropriée, les jeunes enfants ont besoin de contrôler davantage leur comportement, ce qui leur prend plus de temps. De plus, chez les enfants de 3 ans, il existait une forte corrélation négative entre la précision aux essais go et aux essais no-go, mais la corrélation était nulle chez les enfants de 4 à 5 ans. Selon Wiebe et al. (2012), il existe un compromis chez les jeunes enfants, ceux qui répondent plus rapidement et plus précisément aux essais go ayant plus de difficultés à inhiber la réponse aux essais no-go. Néanmoins, ce compromis s'atténue au fur et à mesure que les enfants grandissent, certains enfants de 4 à 5 ans atteignant même des niveaux de performances plafond tant aux essais go qu'aux essais no-go. Qu'en est-il des enfants plus grands ?

### **3.5.3. Le contrôle inhibiteur chez les enfants jusqu'à l'âge adulte (6 ans et plus)**

Pour étudier le contrôle inhibiteur chez les enfants plus âgés, les adolescents et les adultes, les tâches soumises aux jeunes enfants sont également utilisées, mais cette fois normées par des outils psychométriques validés tel que la NEPSY (Korkman, Kirk, & Kemp, 1998). Dans une étude menée à l'aide de la NEPSY, Klenberg, Korkman, et Lahti-Nuutila (2001) ont évalué le développement de l'attention, du contrôle de l'impulsivité et de l'inhibition chez des enfants de 3 à 12 ans. Lorsqu'il n'y avait pas de différence entre les groupes d'âge à un test, les auteurs estimaient que la compétence chez les enfants du groupe le moins âgé était au même niveau de développement que chez les enfants du groupe le plus âgé (12 ans). Ce pattern a été observé à partir de 6 ans dans la tâche de statue (qui évalue le contrôle comportemental), et chez les enfants de 7 ans à la tâche dite « cogner/frapper » (*Knock/Tap*) qui évalue le contrôle de l'impulsivité. Les enfants de 6 ans étaient néanmoins moins performants que les enfants plus âgés à la tâche go/no-go. Il s'agit là d'une difficulté qui serait liée au caractère multidimensionnel de cette tâche, impliquant à la fois des habiletés verbales, motrices et visuelles (Klenberg et al., 2001).

Dans une autre étude de go/no-go auprès d'enfants âgés de 7 à 12 ans, Johnstone, Janette, Smith, et Barry (2007) ont montré une augmentation linéaire dans la précision des réponses (2.5% d'augmentation par an) ainsi qu'une baisse des temps de réaction au fil de l'âge. Ainsi, tout au long du développement, la capacité à retenir une réponse dominante s'améliore. Les jeunes enfants font plus d'efforts de contrôle que les enfants plus âgés (Wiebe et al., 2012), puis cette forte demande se dissipe avec l'âge (Johnstone et al., 2007). Ceci est cohérent avec les résultats de Ikeda et al. (2013). Des enfants âgés de 5 à 12 ans et des jeunes adultes âgés de 24 ans ont été soumis au *pictorial animal size test* (test de la taille de l'animal en image). Cinq groupes d'âges ont été créés (5-6 ans; 7-8 ans; 9-10 ans; 11-12 ans; 24 ans). Les résultats ont montré des différences dues à l'âge concernant le nombre d'erreurs et les temps de réaction. Les enfants de 5 à 8 ans commettaient plus d'erreurs dans la condition incongruente (e.g., éléphant dessiné en petite taille), que dans la condition contrôle (e.g., des rectangles noirs dessinés soit en petite, soit en grande taille) par rapport aux autres groupes d'enfants et celui des jeunes adultes. Il n'y avait pas de différence entre le groupe de 11-12 ans et celui de 24 ans dans la condition congruente (e.g., éléphant dessiné en grande taille). Ainsi, lorsque la taille réelle interfère avec la taille de l'image, tous les participants faisaient plus d'erreurs et prenaient plus de temps, mais ceci était plus marqué chez les enfants de 5 à 8 ans. Par ailleurs, les scores d'interférence étaient plus marqués chez les enfants de 5 à 6 ans, mais baissaient respectivement chez les groupes de 7-8 ans, 9-10 ans, 11-12 ans et 24 ans, montrant par-là que la capacité à contrôler les interférences s'améliore avec l'âge.

En outre, si l'inhibition est autant sollicitée pour réaliser les tâches dans l'enfance, elle devrait être utile pour les apprentissages scolaires.

### **3.6. Contrôle inhibiteur et apprentissages scolaires**

Le développement et les apprentissages sont indissociables. Le contrôle inhibiteur est au cœur du développement cognitif (Borst et al., 2013; Borst et al., 2015; Houdé, 2000; Houdé

& Borst, 2014; Houdé & Guichart, 2001), ce qui suppose qu'il est impliqué dans les apprentissages. Il est par exemple suggéré aux professionnels de l'éducation d'envisager une « pédagogie du cortex préfrontal », en faisant exercer aux élèves la capacité d'inhibition du cerveau (Houdé, 2016). Rossi, Lubin, Lanoë, et Pineau (2012) ont par exemple mené une étude sur l'apprentissage au contrôle cognitif. Des enfants de 4 à 5 ans ont été soumis à un jeu « Candy » (Beleduc Édition) dont l'objectif pédagogique est de développer les capacités d'observation des enfants de 4 ans et plus. C'est un jeu collectif qui consiste à sélectionner parmi quarante bonbons un bonbon cible en fonction d'un critère fourni dans la consigne. Il est donné aux enfants en prétest et en posttest. Entre les deux phases, les enfants réalisaient ensuite une tâche d'apprentissage : la tâche d'inhibition « jacques a dit ». Elle consiste à dire à l'enfant de faire un mouvement seulement lorsque c'est Jacques qui le demande. Deux conditions ont été créées : classique, dite non exécutive et apprentissage exécutif à l'inhibition. Dans la condition non exécutive, l'expérimentateur (l'enseignant) attire l'attention de l'enfant sur la stratégie appropriée. Dans la condition apprentissage exécutif à l'inhibition, en plus d'attirer leur attention, les enfants reçoivent des alertes verbales (e.g., Attention ! Là c'est le piège dont on a parlé tout à l'heure ! Le piège c'est d'avoir envie de bouger parce qu'on entend un ordre et d'oublier que c'est Jacques qui commande) ou visuo-spatiale (e.g., attrape-piège). Les résultats montrent qu'au posttest, les enfants dans la condition apprentissage exécutif à l'inhibition ont un pourcentage de réussites supérieur à ceux dans la condition apprentissage non exécutif. Rossi et al. (2012) soutiennent que l'apprentissage au contrôle cognitif mobilise l'intelligence fluide, permettant aux enfants de changer de stratégie en inhibant leurs automatismes. Dans cette perspective, « [...] l'inhibition est une forme de contrôle attentionnel et comportemental qui permet aux enfants de résister aux habitudes, aux automatismes, aux tentations, aux distractions, aux interférences et de s'adapter aux situations complexes grâce à

la flexibilité acquise. *A contrario*, le défaut d'inhibition peut expliquer certaines difficultés d'apprentissages [...] » (Houdé, 2016, p.55).

L'importance de l'inhibition est déjà présente dans les apprentissages à l'école maternelle. Des liens ont été montrés entre les capacités d'inhibition et la coordination visuomotrice, rendant compte de l'aptitude à dessiner chez des enfants de 3-4 ans (Simpson et al., 2017). À l'école élémentaire, l'inhibition est également cruciale pour l'élève dans divers apprentissages scolaires. L'échec qui consiste à systématiquement associer « plus que » à une addition, fréquemment observé chez les enfants dans les problèmes additifs du type « Louise a 25 billes. Elle a 5 billes de *plus* que Léo. Combien Léo a-t-il de billes ? Léo a 30 bille », est dû à un défaut d'inhibition de l'automatisme d'addition déclenché par l'heuristique « plus que » (Houdé, 2016). En effet, à l'école, l'enfant apprend qu'additionner c'est ajouter, cette connaissance naïve est fortement ancrée dans la mémoire de l'enfant. Aussi, lorsqu'il lit ou entend « plus que », il pense automatiquement à un gain plutôt qu'à une perte. Par conséquent, il additionne au lieu de soustraire, car il ne parvient pas à inhiber cette heuristique.

L'intérêt d'une « pédagogie du cortex préfrontal » apparaît dans l'étude de Lubin, Lanoë, Houdé, et Borst (2013). À l'aide du paradigme d'amorçage négatif, ils ont montré la nécessité d'inhiber l'heuristique pour résoudre des problèmes arithmétiques. Le principe du paradigme d'amorçage négatif est la difficulté d'activer une réponse, lorsque celle-ci a été préalablement inhibée. Des enfants de 11 ans, des adolescents de 14 ans et des jeunes adultes de 24 ans ont été soumis à deux types de problèmes de comparaisons. Il s'agit d'une part, de problèmes à énoncé cohérent, où le terme relationnel "plus que" est cohérent avec l'opération arithmétique requise pour trouver la solution (addition) ; d'autre part, de problèmes à énoncé incohérent, où le terme relationnel "plus que" est incohérent avec l'opération arithmétique (soustraction). Pour résoudre les problèmes à énoncé incohérent, la stratégie « ajouter si plus ou soustraire si moins » doit être inhibée. Un essai consistait pour le participant à lire un énoncé

et exprimer son accord ou désaccord avec l'énoncé. En condition expérimentale, les participants réalisaient des essais amorces et des essais cibles. Les essais amorces étaient constitués de problèmes à énoncé incohérent (e.g., Mary a 25 billes. Elle a 5 billes de plus que John. John a 20 billes), et les essais cibles étaient constitués de problèmes à énoncé cohérent (e.g., Jane a 25 balles. Marc a 5 balles de plus que Jane. Marc a 30 balles). En condition contrôle, l'essai amorce était remplacé par un essai neutre (e.g., Joe a 25 stylos. Marc a 10 stylos. Joe a plus de stylos que Marc). Les participants ont manifesté des temps de réaction plus longs pour effectuer un problème à énoncé cohérent quand celui-ci était précédé d'un problème à énoncé incohérent, que quand il était précédé d'un problème neutre. De plus, les adultes mettaient alors moins de temps à répondre que les adolescents, qui mettaient moins de temps que les enfants. Ces résultats soutiennent l'idée selon laquelle l'enfant a besoin d'inhiber les heuristiques dans la résolution de problèmes, lorsque celles-ci ne sont pas appropriées. Lubin et al. (2016) ont montré que les experts en mathématique résolvent correctement les problèmes arithmétiques de type « Marie a 25 billes. Elle a 5 billes de plus que Jean. Combien de billes a Jean ? » par rapport aux non-experts, parce qu'ils sont plus efficaces pour inhiber l'heuristique « ajouter si plus ou soustraire si moins ». C'est également ce qui est observé dans la comparaison des fractions chez les adolescents et les adultes. Rossi, Vidal, Letang, Houdé, et Borst (2019) ont montré que les adolescent et les adultes instruits avaient besoin d'inhiber l'heuristique « plus le nombre entier est grand, plus la fraction est grande » pour comparer correctement deux fractions qui ont le même numérateur (e.g.,  $4/9$  ;  $4/5$ ). Dans l'apprentissage de la lecture, Borst, Ahr, Roel, et Houdé (2014) ont montré que la supériorité des lecteurs experts réside en partie dans leur aptitude à inhiber le phénomène de généralisation des lettres en miroir (e.g., b/d ; p/q). En effet, pour apprendre à lire, les enfants doivent être capables de ne pas confondre les lettres dont l'image en miroir représente une autre lettre. Ainsi, pour discriminer les lettres en miroir, notre cerveau doit apprendre à inhiber (Houdé, 2016).

L'inhibition est donc nécessaire aux apprentissages scolaires. Lors des apprentissages nouveaux, l'enfant doit parfois inhiber les heuristiques utilisées lors des apprentissages antérieurs. De plus, il doit pouvoir contrôler les interférences causées par les distracteurs qui environnent les tâches d'apprentissage. Dans notre premier chapitre, nous avons vu qu'une tâche présentée sur l'interface d'une tablette numérique est environnée par des éléments de décor, qui constituent ce que nous appelons un contexte numérique d'apprentissage. Le traitement de ces éléments de décor peut entraver la réalisation de la tâche (Park, Moreno, Seufert, & Brünken, 2011). Ceux-ci doivent par conséquent être inhibés. Dans cette perspective, en considérant que dans le cadre du transfert numérique, la tâche de transfert est présentée sur une interface différente de celle de la tâche principale, il est intéressant d'analyser les liens entre le transfert numérique et l'inhibition.

### **3.7. Contrôle inhibiteur et transfert numérique**

La relation entre contrôle inhibiteur et transfert numérique n'a pas donné lieu à un nombre important de recherches, mais des liens peuvent néanmoins être envisagés. En effet, le transfert d'apprentissage est rendu possible par la similarité conjointe des tâches et des contextes de présentation de celles-ci (Klahr & Chen, 2011). Dans le cadre de tâches numériques le contexte de présentation, que nous avons désigné sous le vocable de contexte numérique, est constitué des éléments de décors environnant la tâche présentée sur l'interface graphique. Une même tâche proposée sur un même appareil numérique peut donc bénéficier de plusieurs contextes numériques de présentation différents. La difficulté à réussir le transfert numérique peut provenir des interférences causées à la fois par les éléments de surface de la tâche principale non pertinents en tâche de transfert ; et par la dis-similarité entre les éléments contextuels de l'interface graphique de présentation de la tâche principale et les éléments contextuels de l'interface graphique de présentation de la tâche de transfert. Ainsi, pour parvenir à traiter les éléments de structure des deux tâches et ainsi opérer le transfert de la première à la

seconde, l'enfant doit, non seulement contrôler les interférences causées par les éléments de surface de la tâche de transfert (dis-similarité des tâches) ; mais aussi contrôler les interférences causées par les éléments de décors contenus dans l'interface graphique de la tâche de transfert, éléments de décor agrémentant la tâche mais non-indispensables à sa résolution (dis-similarité des contextes). Le contrôle des interférences est rendu possible par le contrôle inhibiteur (Diamond, 2013), ce qui rend probable l'implication du contrôle inhibiteur dans le transfert numérique.

Pour que l'enfant traite les éléments de structure de la tâche de transfert, il doit pouvoir inhiber les nouveaux éléments de surface, qui, dans le cadre du transfert d'un apprentissage d'une tâche numérique vers une tâche tangible, sont saillants. La saillance des éléments tangibles de la tâche de transfert peut porter sur leur dimension (3D), et/ou sur leurs propriétés physiques. Ceci conduit fréquemment les enfants à identifier les éléments de la tâche tangible comme des objets en tant que tels, et non comme les référents des éléments présents dans la tâche numérique (Barr, 2010 ; Moser et al., 2013 ; Zack et al., 2009). Ainsi, les enfants auront tendance à effectuer la tâche de transfert sans se référer à la tâche principale. Suddendorf (2003) a par exemple montré que lorsque des enfants de 2 ans doivent se référer à une vidéo pour retrouver une figurine cachée dans une pièce parmi 4 cachettes, ils persistent à chercher l'objet dans la première cachette qu'ils ont vue sur la vidéo et où il n'y a pourtant pas l'objet, contrairement aux enfants de 3 ans qui parviennent à trouver la figurine après quelques erreurs. L'auteur attribue cet échec à un défaut d'inhibition, ne permettant pas de maintenir à distance des interférences proactives causées par le premier emplacement vu sur la vidéo. Ces résultats sont cohérents avec ceux de plusieurs études ayant montré un premier palier de développement de l'inhibition à 3 ans (Best & Miller, 2009; Klenberg et al., 2001; Simpson et al., 2012). Ainsi, s'il a été montré que la difficulté des jeunes enfants à effectuer un transfert numérique s'explique par leur faible aptitude à construire une représentation symbolique (Anderson &

Pempek, 2005; Barr, 2010), une autre cause de cette difficulté pourrait être un défaut d'inhibition.

Aussi, dans un premier cas de transfert numérique, c'est-à-dire lorsque la situation de transfert comporte une tâche numérique et une tâche tangible, quand les enfants interagissent avec des objets tangibles ils se les représentent comme objets et non comme symboles. À cause de la saillance des objets tangibles, provenant de la possibilité d'interagir directement avec ces objets, les enfants ont tendance à réaliser les tâches tangibles sans exercer un contrôle fort sur leurs comportements (Carlson et al., 2005; Deloache, 2000). Ces auteurs suggèrent d'ailleurs d'utiliser les symboles, car ils permettent de prendre de la distance avec les objets tangibles. Dans un paradigme de transfert numérique mettant en jeu une tâche principale au support numérique et une tâche de transfert au support tangible, l'enfant doit se référer à une tâche numérique en 2D, pour réaliser une tâche tangible en 3D. Pour réussir un tel transfert, l'enfant doit être capable d'inhiber la saillance des éléments de la tâche en 3D.

Dans un second cas du transfert numérique, c'est-à-dire lorsque la situation de transfert comporte deux tâches numériques, les éléments de décor environnant la tâche présentée sur l'interface graphique peuvent interférer sur le transfert. En effet, lorsque ces éléments ne sont pas pertinents pour la réalisation de la tâche, leur traitement occasionne une charge cognitive extrinsèque qui perturbe l'apprentissage (voir Park et al., 2011, pour une revue), ce qui rend moins efficace, voire inefficace, le traitement des éléments pertinents de la tâche elle-même, à cause de la capacité limitée de la mémoire de travail. Une solution pour éviter cette charge cognitive extrinsèque consiste à inhiber ces éléments de décor. Ainsi, dans cette situation de transfert numérique comprenant deux tâches numériques, lorsque les interfaces de présentation des deux tâches sont différentes, il faut être capable d'inhiber les éléments de décor de l'interface de la tâche de transfert, afin de traiter efficacement les éléments de la tâche elle-

même et déceler les similarités avec la tâche principale, pour in fine transférer l'apprentissage de la première tâche à la seconde.

### **3.8. Problématique**

Du fait de leurs multiples fonctions pédagogiques (Tricot, 2020), et de leur impact sur le développement cognitif (Académie des Sciences, 2013), les outils numériques sont de plus en plus utilisés dans les établissements scolaires. Parmi les outils numériques, la tablette numérique est l'outil le plus accepté par les enfants (Amadiou et al., 2019), car elle a des caractéristiques spécifiques qui en facilitent l'usage (e.g., écran tactile, intuitivité perceptive, propriété d'affordance, Baccino & Draï-Zerbib, 2012). Dans cette perspective, certains chercheurs suggèrent de concevoir des applications éducatives sur les tablettes numériques pour favoriser l'apprentissage autonome chez l'enfant (Hirsh-Pasek et al., 2015). La question est donc de savoir si les enfants sont capables d'apprendre sur les outils numériques en général, et les tablettes en particulier.

Dans le chapitre 1, nous avons vu que les enfants sont capables d'apprendre à partir des applications des tablettes numériques, lorsque ces applications tiennent compte des piliers de l'apprentissage (Hirsh-Pasek et al., 2015). Un effet positif de la tablette numérique sur les apprentissages scolaires a d'ailleurs été montré dans la littérature (Haßer et al., 2016). Néanmoins, l'efficacité pédagogique des tablettes numériques sur l'apprentissage est controversée, car elle dépend de l'acceptabilité de la tablette qui fluctue selon les besoins de l'apprenant et les exigences de la tâche (Amadiou et al., 2019). Cette controverse sur l'efficacité des tablettes numériques dans l'apprentissage est corroborée par une récente méta-analyse de Xie et al. (2018) portant sur l'effet des écrans tactiles sur l'apprentissage chez les enfants de 0-5 ans. Les 36 études recensées montrent un effet positif des écrans tactiles sur l'apprentissage, mais cet effet est modulé par l'âge, le domaine de la tâche d'apprentissage (e.g., les Sciences de la Technologie, de l'Ingénierie et des Mathématiques « STEM », résolution de problème non

verbaux), le groupe de comparaison (e.g., regarder une vidéo sur un écran, ne recevoir aucune information explicite pour réaliser la tâche sur un support tangible), et l'environnement expérimental (e.g., laboratoire, salle de classe). Ainsi, lorsque tous ces facteurs sont contrôlés, les enfants sont capables d'apprendre sur la tablette numérique, mais sont-ils pour autant capables de transférer leur apprentissage à des tâches présentées sous d'autres supports ? Ceci revient à analyser les conditions dans lesquelles le transfert est susceptible d'être réussi.

Dans le chapitre 2, nous avons vu avec le modèle de Klahr et Chen (2011) que la probabilité que le transfert soit réussi est grande lorsqu'il est effectué dans une situation de *near transfer*, c'est-à-dire lorsque le degré de similarité entre les tâches est fort ainsi qu'entre leurs contextes de présentation. En revanche, dans une situation de *far transfer*, c'est-à-dire lorsque le degré de similarité entre tâches est faible ainsi qu'entre leurs contextes de présentation, le transfert est rarement réussi. Curieusement, une littérature récente sur le transfert d'apprentissage montre que chez l'enfant, même dans une situation de *near transfer*, le transfert s'accompagne parfois d'une baisse de performance à la tâche de transfert. Cette baisse peut en effet être observée dans le transfert de stratégies cognitives (Clerc et al., 2017, 2021; Elsner & Schellhas, 2012; Gamo, Sander, & Richard, 2010), dans le transfert par analogie (Thibaut & Witt, 2015; Resing, et., 2016), dans le transfert de connaissances implicites (Detable & Vinter, 2006; Pacton et., 2001), et dans le transfert de capacités motrices (Adi-Japha & Brestel, 2020). Les explications à cette baisse de performances sont d'une part, un manque d'entraînement spécifique ne permettant pas d'avoir un niveau de compréhension suffisant de la tâche principale pour pouvoir saisir la solution (ou la stratégie) à transférer (Green, Strobach, & Schubert, 2014). D'autre part, cette baisse de performances semble liée à une dis-similarité des éléments de surface qui varient d'une tâche à l'autre, ne permettant pas à l'enfant de traiter directement les informations liées à la structure de la tâche, dont l'accès est entravé par le traitement des éléments de surface. Pour cette raison, la correspondance entre les tâches est

difficile à effectuer (Ripoll & Coulon, 2001). Par ailleurs, si la dis-similarité de surface entre deux tâches occasionne une baisse de performances au transfert, on peut supposer que cette baisse de performances pourrait encore être plus marquée si le support de présentation, qui relève du contexte d'apprentissage, change d'une tâche à une autre.

La recherche sur le transfert numérique montre que chez les très jeunes enfants, lors du passage d'une tâche en 2D à une tâche en 3D, on observe fréquemment une baisse de performances (Barr, 2010; Moser et al., 2015; Zack et al., 2009). Cependant, chez l'enfant d'âge scolaire, cette baisse de performances est controversée, notamment dans la tâche de la Tour de Hanoï, dont certaines études rapportent de bonnes performances au transfert chez des enfants de 6 ans (Huber et al., 2016; Tarasuik, Demaria, & Kaufman, 2017) et d'autres, des performances qui déclinent lors du passage de la tâche principale à la tâche de transfert chez des enfants de 8 ans (Schiff & Vakil, 2015). Pour cette raison, il nous paraît pertinent d'étudier le transfert numérique avec comme support la tâche de la Tour de Hanoï, en considérant les différents facteurs impliqués dans le transfert entre tâches tangibles (e.g., entraînement, degré de similarité des tâches, degré de similarité des contextes).

L'étude du transfert numérique utilise typiquement une tâche numérique en 2D (tâche principale) dont l'apprentissage doit être réutilisé dans une tâche tangible en 3D (tâche de transfert). Le nombre de dimensions (2D vs 3D) se trouve ainsi confondu avec le type de support (numérique vs tangible), ce qui ne permet pas d'étudier les effets de ces deux variables de façon séparée. Pour identifier la cause de l'échec ou de la réussite au transfert numérique chez l'enfant en résolution de problèmes, il pourrait être utile de différencier la tâche en 2D de celle en 3D et ceci indépendamment de leurs supports de présentation. De plus, nous avons vu que l'interface d'une tablette numérique peut être considérée comme un contexte d'apprentissage à part entière, en l'occurrence un contexte numérique. Ceci suppose que sur une même tablette et pour une même tâche, il peut y avoir plusieurs contextes numériques d'apprentissage. Si tel est le

cas, dans une situation de transfert numérique, il peut y avoir à la fois un changement de tâches et un changement de contextes, ce qui pourrait décupler le phénomène de baisse de performances au transfert en ajoutant des dis-similarités aux dis-similarités. En plus de « déconfondre » les dimensions des tâches (2D vs 3D) de leurs supports de présentation (numérique vs tangible), il serait donc également intéressant de tester l'effet du contexte numérique dans le transfert numérique, chez l'enfant en résolution de problème. Nous envisagerons conjointement la variation des deux dimensions de transfert, à savoir tâches et contextes, ce qui nous permettra de tester le modèle de Klahr et Chen (2011) dans le cas d'un transfert numérique.

Dans le transfert numérique, à la nouveauté des éléments de surface de la tâche de transfert, peut s'ajouter la nouveauté des éléments de contexte qui environnent la tâche sur l'interface graphique de présentation. Cette double dis-similarité, essentiellement perceptive, pourrait occasionner des interférences que l'enfant doit contrôler pour accéder à la structure de la tâche. Le chapitre 3 nous a montré que le contrôle des interférences est assuré pas le contrôle inhibiteur (Diamond, 2013). Celui-ci est en effet impliqué d'une part, dans le contrôle des stimuli environnementaux (une forte lumière dans la salle, un bruit, une image associée à la tâche...), dont le traitement consomme une partie des ressources cognitives nécessaires pour réaliser la tâche, ne permettant pas un traitement optimal de la structure de la tâche. Ceci est compatible avec l'hypothèse d'une implication du contrôle de l'interférence dans les tâches numériques, car celles-ci sont présentées sur des interfaces graphiques qui contiennent des éléments perceptifs potentiellement interférents qui nécessitent d'être délibérément ignorés. D'autre part, le contrôle des interférences est impliqué dans le contrôle des stimuli internes (des représentations mentales, des règles procédurales...). Dans la tâche de Tour de Hanoï, les contraintes externes (i.e., les règles explicites liées à la tâche) ont tendance à rentrer en conflit avec les contraintes internes (i.e., les règles implicites que s'impose l'enfant) (Richard et al.,

1993). Pour cette raison, les mouvements de l'enfant sont conduits par l'heuristique « troisième tige = grand disque », que l'enfant doit nécessairement contrôler. Conformément au modèle de Diamond (2013), le contrôle de toutes ces interférences est assuré par une facette du contrôle de l'interférence qui est l'inhibition cognitive. De plus, selon Houdé et Borst (2015), l'inhibition consiste à retenir les pensées heuristiques lorsque celles-ci sont inappropriées, afin d'activer les pensées algorithmiques, ce qui est cohérent avec l'hypothèse d'une implication du contrôle de l'interférence dans la Tour de Hanoï. Dès lors, nous pouvons supposer un lien entre les capacités d'inhibition cognitive et le transfert numérique, dans la tâche de résolution de problème de la Tour de Hanoï chez l'enfant.

L'originalité de ce travail de thèse est double. Premièrement, ce travail vise à étudier le rôle potentiel de l'inhibition cognitive dans la résistance à la baisse de performances au transfert, dans une situation de transfert numérique entre différentes versions de la Tour de Hanoï, ce qui, à notre connaissance, n'a pas encore été étudié. Deuxièmement, nous envisageons de tester les effets d'un entraînement spécifique et de la similarité conjointe des tâches et des contextes, sur la baisse de performances au transfert dans le cadre d'un transfert numérique, ce qui permettra de tester la validité empirique du modèle de Klahr et Chen (2011) dans un contexte numérique, ce qui à notre connaissance n'a pas encore été étudié non plus. En effet, ce modèle n'a pas été pensé pour expliquer le transfert numérique, son application au transfert numérique est nouvelle et potentiellement fructueuse.

Nous formulons deux hypothèses générales. La première hypothèse soutient l'idée qu'il y a un lien entre le contrôle inhibiteur et la baisse de performances entre différentes versions de la Tour de Hanoï dans le transfert numérique. La seconde hypothèse suppose que la baisse de performances au transfert en résolution de problème dans le transfert numérique est fonction du degré de similarité entre la tâche principale et la tâche de transfert ainsi qu'entre leurs contextes

respectifs de présentation. Ces hypothèses générales font place à plusieurs hypothèses opérationnelles qui conduiront nos études.

Trois études ont été menées auprès d'enfants âgés de 6 à 7 ans. Dans toutes ces études, nous avons voulu vérifier si l'inhibition joue un rôle particulier dans la résistance à la baisse de performances au transfert, dans une situation de transfert numérique entre différentes versions de la Tour de Hanoï. Nous avons également testé, dans le transfert numérique entre différentes versions de la Tour de Hanoï, les effets de différents facteurs impliqués dans le transfert tangible, en l'occurrence similarités et entraînement.

La première étude a pour objectif de chercher à savoir si un entraînement, qui faciliterait l'adaptation à la tâche de transfert, pourrait prémunir un enfant de la baisse de performances au transfert dans une situation de transfert numérique comportant deux tâches, principale et de transfert, au support numérique.

L'objectif de la deuxième étude est de chercher à savoir si dans le transfert numérique, la similarité conjointe des tâches et des supports de présentation (e.g., numérique/numérique ; tangible/tangible ; numérique/tangible ; tangible/numérique) permettrait à l'enfant de résister à la baisse de performances au transfert. La tâche principale est présentée au support tangible ou numérique selon le groupe de participants, et il en est de même pour la tâche de transfert.

La troisième étude cherche à savoir si un fort degré de similarité des tâches et ainsi que des contextes numériques, dans le cas de deux tâches numériques, peut aider l'enfant à faire face à la baisse de performances au transfert numérique, ce qui revient à tester la validité du modèle de Klahr et Chen (2011).

# **CONTRIBUTION EXPERIMENTALE**

---

## **CHAPITRE 4 : ETUDE 1. TRANSFERT NUMERIQUE ENTRE DIFFERENTES VERSIONS DE LA TOUR DE HANOÏ CHEZ L'ENFANT : EFFET DE L'ENTRAÎNEMENT SPECIFIQUE ET ROLE DE L'INHIBITION COGNITIVE**

---

### **4.1. Objectifs**

Le premier objectif de cette étude est de tester l'effet d'un entraînement spécifique sur la résistance au phénomène de baisse de performances entre différentes versions numériques de la Tour de Hanoï chez l'enfant. En effet, l'existence d'une baisse de performances lors du passage à une tâche de transfert isomorphe est controversée (Huber et al., 2016; Tarasuik et al., 2017; Schiff & Vakil, 2015). Du fait de l'importance du niveau de compréhension initiale de la tâche principale dans la capacité à transférer (Chi & Valehn, 2012), la question est de savoir si un entraînement spécifique (Green, et al., 2014) peut prémunir les enfants face à une telle baisse de performances au transfert en augmentant le niveau de compréhension de la tâche principale. En effet, on peut s'attendre à une baisse de performances au transfert entre différentes versions numériques de la Tour de Hanoï présentant des dis-similarités de surface et de contexte numérique (H1). Néanmoins, des enfants ayant bénéficié d'un entraînement en tâche principale devraient obtenir des performances de transfert plus élevées, et un entraînement hautement spécifique à la tâche devrait permettre une meilleure compréhension de celle-ci qu'un entraînement moyennement spécifique ou non-spécifique (H2). De plus, la baisse de performances observée dans la tâche de transfert devrait être temporaire chez les enfants entraînés, la performance remontant à mesure que l'enfant s'adapte à cette nouvelle tâche grâce à l'entraînement reçu en tâche principale (H3).

De plus, du fait qu'un défaut d'inhibition a été suggéré comme potentielle cause des difficultés de transfert chez l'enfant (Clerc et al., 2014), le deuxième objectif de cette étude est d'investiguer le rôle de l'inhibition cognitive dans la résistance à la baisse de transfert. Pour

cette raison, on peut s'attendre à ce que la performance au transfert soit plus basse chez des enfants montrant des capacités d'inhibition moins élevées (H4).

## 4.2. Méthode

### 4.2.1. Participants

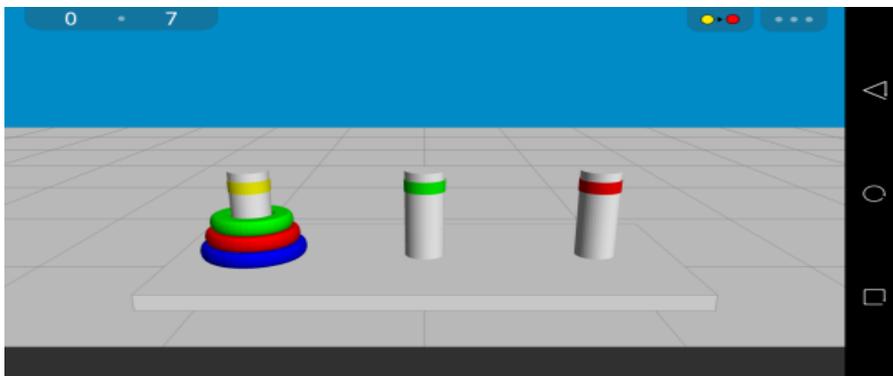
Cent dix-huit enfants ( $M_{\text{âge}} = 6$  ans 9 mois,  $SD_{\text{âge}} = .52$ , 61 garçons) fréquentant deux écoles primaires d'une agglomération française ont participé. Selon les informations délivrées par les parents et les enseignants, aucun enfant ne présentait de signes de développement atypique, de troubles cognitifs ou des apprentissages. Les parents des participants ont donné leur accord en remplissant un formulaire de consentement éclairé. L'étude a reçu un avis favorable du comité éthique d'une université française (Protocole N° 2017-6-S56, cf. Annexe 1).

### 4.2.2. Matériel

Quatre tâches numériques ont été proposées, réalisables sur une tablette numérique tactile : la Tour de Hanoï à trois disques, la Tour de Hanoï à trois carrés, une tâche d'empilement de disques, et le jeu du Memory. Les tâches devaient être effectuées en faisant glisser le doigt sur l'écran tactile. La tablette utilisée était de marque *acer Iconia One 10 B3-A40-K2AM 10.1*, avec une taille d'écran de 10,1", une résolution de 1280×800 px, une longueur de 258 mm, une largeur de 167,5 mm et une hauteur de 9,15 mm.

**Tour de Hanoï numérique à trois disques.** Cette tâche est proche de celle utilisée par Huber et al. (2016). Elle est constituée d'un support horizontal surmonté de trois tiges verticales, sur lesquelles peuvent être enfilés trois disques troués en leur milieu (un petit disque vert, un moyen rouge et un grand jaune). Chaque tige est colorée en son sommet d'une des trois couleurs des disques, ceci afin de créer des distracteurs perceptifs dans le but de solliciter les capacités d'inhibition. Les disques sont empilés du plus grand au plus petit sur la tige de gauche,

et le but de la tâche est de reconstituer cette configuration sur la tige de droite. Nous avons utilisé une version téléchargée sur Playstore (développée et mise à jour par les studios GRuV en 2017, © Google 2017), comprenant comme éléments de décor un mur bleu et un sol carrelé. Pour déplacer les disques, le participant touche le disque choisi avec son doigt, l'enfile dans la tige choisie en le faisant glisser. Cette version numérique de la Tour de Hanoï fournit au participant un feedback correctif systématique : lorsqu'un disque est placé sur un plus petit (mouvement illégal), il est immédiatement et systématiquement renvoyé à son emplacement initial avant de pouvoir reprendre la partie.



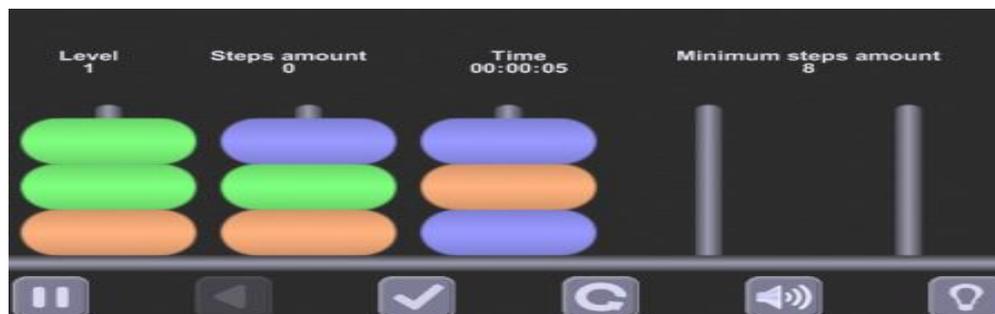
**Figure 13.** Version numérique de la Tour de Hanoï à trois disques.

**Tour de Hanoï numérique à trois carrés.** Cette tâche est une version numérique de la Tour de Hanoï dans laquelle les tiges sont remplacées par des planches. Elle est composée d'un empilement de trois carrés (un petit carré rouge, un moyen vert et un grand violet). Les carrés sont empilés du plus grand au plus petit sur la planche de gauche et le but de la tâche est de reconstituer cette configuration sur la planche de droite. Nous avons utilisé une version téléchargée sur Playstore (développée et mise à jour par les studios Skarcat en 2016, © Google 2017), comprenant comme éléments de décor de l'herbe, des arbres, une chèvre et une cabane. Contrairement à la version à trois disques, dans cette tâche, pour déplacer les carrés, le participant doit toucher le carré qu'il a choisi, puis il touche la planche sur laquelle il veut déplacer le carré. Le participant reçoit le même feedback correctif que dans la tâche précédente.



**Figure 14.** Version numérique de la Tour de Hanoi à trois carrés.

**Empilement de disques.** Cette tâche est composée de cinq tiges et de neuf disques. Les disques sont tous de la même taille et sont de trois couleurs différentes (trois disques verts, trois disques violets, trois disques marrons). L'objectif est d'empiler les disques trois par trois, les disques de la même couleur devant être placés sur une même tige. Un disque ne peut pas être placé sur un disque de couleur différente. Les déplacements sont autorisés vers la droite et vers la gauche. Le participant reçoit le même feedback correctif, à chaque fois qu'il violait une règle, c'est-à-dire mettre un disque de couleur différente sur un autre. Cette tâche a été élaborée par les studios Ruslan Goncharenko et mise à jour le 18 juillet 2016, © Google 2017.



**Figure 15.** Tâche de l'empilement de disques.

**Jeu du Memory.** C'est une version numérique du classique jeu Memory. Le jeu se compose de cartes comportant, sur une face, un animal. Chaque animal est représenté deux fois (sur deux cartes jumelles). Dix-huit cartes sont présentées face cachée, réparties aléatoirement sur trois lignes et six colonnes. Le but est de reconstituer toutes les paires d'animaux, en retournant les deux cartes représentant un même animal l'une immédiatement après l'autre.

Lorsque l'enfant touche une carte sur l'écran, celle-ci se retourne et l'animal apparaît. Celui-ci reste visible tant que l'enfant n'a pas touché une autre carte. Quand celle-ci se retourne, si les deux animaux sont identiques, les deux cartes sont retirées du jeu, mais s'il s'agit d'un autre animal les deux cartes reprennent leur position et la partie reprend. Le participant continue jusqu'à épuisement de toutes les cartes. La version numérique a été développée par les studios OwletGames for Kids et mise à jour en janvier 2017, © Google 2017.



**Figure 16.** Jeu du memory.

**HTKS** (cf. Annexe 2). Les capacités d'inhibition ont été mesurées par le test Head, Toes, Knees, Shoulders « HTKS » (Ponitz, McClelland, Matthews, & Morrison, 2009) traduit en français pour les besoins de l'étude. La tâche exige que l'enfant produise une réponse motrice suite à la commande verbale prononcée par l'expérimentateur. Le participant doit toucher une partie du corps différente de celle qui lui est indiquée, par exemple toucher sa tête lorsqu'on lui dit de toucher ses pieds et vice versa. La tâche comprend trois phases : tête et pieds (phase 1), épaules et genoux (phase 2), tête/genoux et épaules/pieds (phase 3). Chaque phase comporte dix items et chaque item rapporte 2 points (réponse correcte), 1 point (réponse auto-corrigée) ou 0 point (réponse incorrecte). Le score maximum est donc de 60 points, un score élevé indiquant une forte capacité d'inhibition. Nous avons choisi ce test parce qu'il permet de tester le contrôle inhibiteur par l'inhibition de réponses motrices comportementales (Diamond, 2013). On peut le voir dans les consignes telles que décrite ici. Tester l'inhibition cognitive via

l'effection motrice est particulièrement adapté aux jeunes enfants (Klenberg et al., 2001; Ponitz et al, 2009).

### **4.2.3. Procédure**

Les enfants ont été vus individuellement, au sein de leur école pendant les heures de classe, hors récréation. Pour les quatre tâches numériques, le participant était assis sur une chaise, avec devant lui une table sur laquelle était posée la tablette numérique. L'expérimentateur était assis sur une chaise à droite du participant. L'étude s'est déroulée en cinq phases comprenant prétest, entraînement, posttest, transfert, et une dernière phase consacrée à l'évaluation des capacités d'inhibition.

#### **Prétest**

La Tour de Hanoï à trois carrés était proposée en matinée. Le but de la tâche ainsi que les règles étaient fournis. Pour s'assurer du niveau de base de tous les participants ainsi que de leur compréhension des règles, un essai était co-réalisé entre l'expérimentateur et le participant (Richard, 1982). Pour ce faire, l'expérimentateur fournissait les règles puis faisait la démonstration d'un mouvement autorisé (« Tu ne peux déplacer qu'un élément à la fois », l'expérimentateur déplace le petit carré sur la dernière planche) et d'un mouvement non- autorisé (« Tu ne peux pas mettre un grand élément sur un plus petit », l'expérimentateur déplace le carré moyen sur le petit, et par le feedback fourni par la tablette numérique, le carré moyen est automatiquement renvoyé à son emplacement initial). L'enfant était alors invité à poursuivre la tâche jusqu'à ce qu'elle soit totalement réalisée. Une explication était fournie au participant à chaque fois qu'il enfreignait une règle (par ex. « le carré est renvoyé parce qu'on ne met pas un grand carré sur un petit carré »). Le participant devait ensuite effectuer seul deux nouveaux essais, sans pause.

## **Entraînement**

Il se déroulait l'après-midi de la même journée. Les participants ont été aléatoirement affectés à un groupe parmi quatre : entraînement hautement spécifique, entraînement moyennement spécifique, entraînement non-spécifique, pas d'entraînement (groupe contrôle). Dans chacun de ces groupes, les participants devaient effectuer quatre essais.

***Entraînement hautement spécifique.*** Dans cette condition, l'enfant est entraîné à effectuer la Tour de Hanoï à trois carrés utilisée lors du prétest. L'expérimentateur réalise la tâche devant le participant en lui demandant d'être attentif aux explications : « Tu viens de réaliser cette tâche tout seul, maintenant je vais te montrer, une fois, comment on fait, puis tu devras la réaliser quatre fois tout seul ». L'expérimentateur effectue alors un essai de démonstration pendant lequel chaque séquence d'action traduisant une résolution efficiente est décrite, c'est-à-dire qu'on fournit au participant les informations qui lui permettront d'acquérir une procédure d'exécution afin de réaliser la tâche avec le minimum de mouvements possible : « Tu prends d'abord le petit carré et tu le mets sur la dernière planche ; ensuite tu mets le carré moyen sur la planche du milieu ; puis tu mets le petit carré sur le carré moyen ; etc. ». L'enfant réalise ensuite seuls les quatre essais d'entraînement. A chaque fois qu'il se trompe, la tablette numérique lui fournit un feedback correctif (le.s carré.s est/sont renvoyé.s à sa/leur place.s initiale.s), ce feedback étant assorti d'une explication fournie par l'expérimentateur (par ex. « Non ce n'est pas possible. Souviens-toi, tu ne peux déplacer qu'un carré à la fois »).

***Entraînement moyennement spécifique.*** Les enfants de ce groupe sont entraînés à la tâche d'empilement de disques. L'expérimentateur dit au participant : « Maintenant tu vas jouer à un autre jeu ». On explique alors à ce dernier les règles du jeu, tout en lui montrant comment jouer (essai de démonstration). La démonstration est accompagnée d'explications décrivant les phases de réalisation efficiente de la tâche, en effectuant le minimum de mouvements possible (huit mouvements) : « Tu mets par exemple le disque bleu ici, ensuite tu prends également

l'autre disque bleu que tu poses sur le premier, etc. ». L'enfant réalise ensuite seul quatre essais d'entraînement. En cas d'erreur, le participant reçoit un feedback correctif (par ex. si le participant met un disque violet sur un disque marron, le disque violet est renvoyé à son emplacement initial) assorti d'une explication (« Non ce n'est pas là. Souviens-toi, tu ne dois mettre un disque d'une couleur que sur un autre disque de même couleur »).

***Entraînement non-spécifique.*** Les participants sont entraînés au jeu du Memory. L'expérimentateur dit au participant : « Maintenant tu vas jouer à un autre jeu ». Pour s'assurer que le participant connaît les animaux représentés sur les cartes, il est invité à toucher toutes les cartes les unes après les autres et à identifier l'animal ainsi dévoilé : « Touche une carte, tu vois, elle se retourne. Qu'est-ce que c'est ? ». Si le participant ne parvient pas à identifier correctement l'animal, on lui fournit le nom exact. On explique ensuite au participant les règles du jeu, puis un essai de démonstration est fourni : « Regarde bien comment je fais, je touche d'abord cette carte, elle montre un animal. Je cherche alors l'autre carte qui cache le même animal : si la carte que je touche maintenant montre le même animal, les deux cartes sont retirées du jeu ; si elle ne montre pas le même animal, les deux cartes restent dans le jeu mais j'essaie de retenir l'endroit de la carte que je viens de toucher ». Le participant effectue alors quatre essais d'entraînement au cours desquels il reçoit, en cas d'erreur, un feedback correctif (les deux cartes non-jumelles sont retournées et restent dans le jeu) assorti d'une explication (« Non ce n'est pas la bonne. Souviens-toi, tu dois retourner les deux cartes identiques »).

***Pas d'entraînement.*** Pour que ces participants ne soient pas frustrés de ne pas avoir pu jouer à un autre jeu que la Tour de Hanoï, ils étaient rencontrés après la fin de l'étude et pouvaient réaliser soit la tâche d'empilement, soit le jeu du Memory.

## **Posttest**

Cette phase avait lieu le lendemain matin et était identique au prétest (Tour de Hanoï à trois carrés). Deux essais devaient être effectués, sans pause ni explication en cas d'erreur, mais avec feedback correctif.

## **Transfert**

Cette phase prenait place le même jour que le posttest, dans l'après-midi. Pour des raisons personnelles, trois participants ont réalisé la tâche de transfert le lendemain du posttest. La phase de transfert était identique pour tous les participants, qui étaient invités à réaliser la Tour de Hanoï à trois disques sans qu'il ne soit fait mention de la ressemblance avec la tâche effectuée en prétest (Tour de Hanoï à trois carrés). L'expérimentateur expliquait les règles à l'enfant, qui devait alors réaliser deux essais sans pause ni explication en cas d'erreur, mais avec feedback correctif. La présence de ce feedback correctif en tâche de transfert visait à maximiser les similarités entre tâche principale et tâche de transfert, afin d'augmenter la probabilité d'un transfert réussi. Ainsi, si une baisse de performance au transfert est observée, elle ne pourra pas être interprétée comme provenant d'une différence entre les conditions de feedback des deux tâches.

## **Inhibition**

Afin de limiter la charge cognitive, après la phase de transfert nous avons laissé deux jours s'écouler avant de revenir vers nos participants pour les soumettre au test HTKS. Les trois phases de ce test étaient passées en une fois, sans pause.

## **4.3. Résultats**

Chaque enfant était affecté à l'une des quatre conditions, entraînement hautement spécifique ( $n = 36$ ,  $M$  âge = 7ans,  $SD = .46$ ), entraînement moyennement spécifique ( $n = 29$ ,  $M$  âge = 6.83 ans,  $SD = .53$ ), non-spécifique ( $n = 24$ ,  $M$  âge = 6.88 ans,  $SD = .59$ ), et pas

d'entraînement ( $n = 29$ ,  $M$  âge = 6.95 ans,  $SD = .55$ ). Il n'y a pas de différence de moyennes d'âge entre les groupes  $F(3, 23) = 1.36$ ,  $p = .26$ .

Pour les deux versions de la Tour de Hanoi, nous avons mesuré le nombre total de mouvements nécessaires à la résolution de la tâche et correspondant à toutes les séquences d'action effectuées pour réaliser la tâche. Nous présentons ci-dessous les performances aux phases de prétest (2 essais), posttest (2 essais) et transfert (2 essais). Les résultats ont été traités par analyse de variance (Anova) et comparaisons planifiées. Par ailleurs, parce que le nombre de mouvements effectués pour réaliser la tâche est proportionnel au temps de résolution, nous n'avons pas jugé pertinent d'analyser les temps de résolution. De plus, dans plusieurs études antérieures, le temps de résolution par mouvement était obtenu en divisant le temps de résolution total par le nombre de mouvements (Huber et al., 2016; Schiff & Vakil, 2015), ce qui est contestable car tous les mouvements ne sont pas nécessairement exécutés avec la même vitesse, le premier mouvement pouvant être plus lent que le dernier, du fait de la compréhension de la tâche au fil de sa réalisation. A titre de vérification, nous présenterons néanmoins les corrélations entre le nombre de mouvements nécessaires pour effectuer la tâche et le temps total de résolution (*cf.* Tableau 1).

#### **4.3.1. Analyse des mouvements**

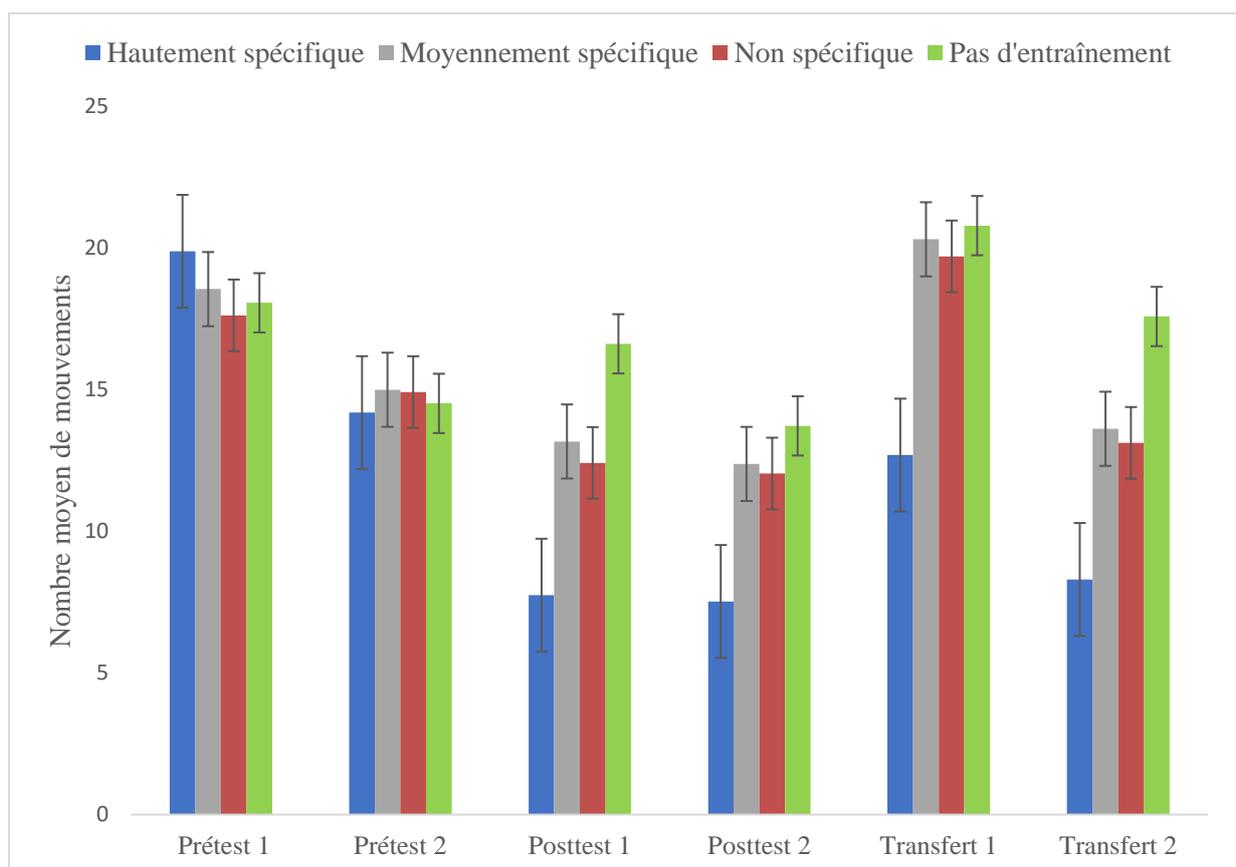
Une Anova à mesures mixtes 6 (essais) \* 4 (conditions d'entraînement) a été effectuée sur le nombre de mouvements produits. L'effet du facteur essai est significatif,  $F(5, 570) = 21.42$ ,  $p < .001$   $\eta^2p = .59$ . Pour tester l'hypothèse d'une baisse de performances au transfert, le second essai de posttest a été comparé au premier essai de transfert. La performance baisse significativement (*cf.* Figure 17), les enfants réalisant le premier essai de transfert ( $M = 17.47$ ,  $SD = 8.97$ ) en un nombre de mouvements significativement supérieur à celui nécessaire à la réalisation du second essai de posttest ( $M = 11.16$ ,  $SD = 5.83$ ) (comparaison planifiée,  $p < .001$ ). Pour observer la qualité de la performance entre le premier et le second essai de transfert, ces

deux essais ont été comparés. Le nombre de mouvements nécessaire pour effectuer le second essai de transfert ( $M = 12.87$ ,  $SD = 6.26$ ) est significativement inférieur à celui requis pour effectuer le premier essai de transfert ( $p < .001$ ), attestant que la performance ré-augmente dans le second essai de transfert. De plus, afin de nous assurer que la tâche principale et la tâche de transfert étaient d'un niveau de difficulté équivalent, nous avons également comparé le premier essai de prétest ( $M = 18.65$ ,  $SD = 10.75$ ) au premier essai de transfert. La différence n'est pas significative, les enfants réalisant la tâche en un nombre équivalent de mouvements en prétest 1 et en transfert 1, ce qui atteste que les deux tâches sont de difficulté équivalente. Ainsi, la baisse de performance entre posttest 2 et transfert 1 n'est pas due à une différence dans les niveaux de difficulté des deux tâches mais dans le changement de tâche en lui-même.

L'effet principal du facteur entraînement est significatif,  $F(3, 114) = 10.50$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2p = .22$ . Le nombre de mouvements en condition d'entraînement hautement spécifique ( $M = 11.73$ ,  $SD = 5.75$ ) est significativement inférieur à ceux en condition d'entraînement moyennement spécifique ( $M = 13.62$ ,  $SD = 7.89$  ( $p = .001$ ), non-spécifique ( $M = 14.56$ ,  $SD = 4.790$  ( $p = .037$ ), et sans entraînement ( $M = 16.98$ ,  $SD = 8.38$ ) ( $p < .001$ ). Les autres différences ne sont pas significatives.

L'effet d'interaction essai \* entraînement est significatif,  $F(15, 570) = 3.07$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2p = .08$ . Les comparaisons planifiées montrent que lors de l'essai 1 de posttest la performance des enfants ayant bénéficié d'un entraînement hautement spécifique ( $M = 7.75$ ,  $SD = 2.01$ ) est supérieure à la performance des enfants dans les conditions moyennement spécifique ( $M = 13.17$ ,  $SD = 5.62$ ), non-spécifique ( $M = 12.42$ ,  $SD = 4.31$ ) et pas d'entraînement ( $M = 16.62$ ,  $SD = 8.85$ ) ( $p < .001$ ). À l'essai 2 du posttest, la performance des enfants ayant bénéficié d'un entraînement hautement spécifique ( $M = 7.53$ ,  $SD = 1.80$ ) est également supérieure à la performance des enfants dans les conditions moyennement spécifique ( $M = 12.38$ ,  $SD = 5.60$ ), non-spécifique ( $M = 12.04$ ,  $SD = 4.77$ ) et pas d'entraînement ( $M = 13.72$ ,  $SD = 7.86$ ) ( $p < .001$ ).

À l'essai 1 de transfert, les résultats montrent encore que la performance des enfants ayant bénéficié d'un entraînement hautement spécifique ( $M = 12.69$ ,  $SD = 6.84$ ) est également supérieure à la performance des enfants dans les conditions moyennement spécifique ( $M = 20.31$ ,  $SD = 11.23$ ), non-spécifique ( $M = 17.21$ ,  $SD = 6.62$ ) et pas d'entraînement ( $M = 20.79$ ,  $SD = 7.92$ ) ( $p < .001$ ). Les conditions moyennement spécifiques, non spécifique et pas d'entraînement n'ont donné lieu à aucune différence significative quand elles ont été comparées entre elles deux à deux. Ceci montre que l'entraînement hautement spécifique a permis une augmentation de la performance au fur et à mesure de la répétition des essais. De plus, afin de caractériser l'évolution des performances dans les différents groupes, des comparaisons par paires ont été effectuées entre les essais de posttest 2, transfert 1 et transfert 2, pour chaque condition.



**Figure 17.** Nombre moyen de mouvements à chaque essai en fonction du type d'entraînement. Les barres d'erreur représentent les erreurs-types.

En condition d'entraînement hautement spécifique les enfants font moins de mouvements en posttest 2 ( $M = 7.53$ ,  $SD = 1.80$ ) qu'en transfert 1 ( $M = 12.69$ ,  $SD = 6.84$ ) ( $p < .001$ ), et davantage de mouvements en transfert 1 qu'en transfert 2 ( $M = 8.31$ ,  $SD = 2.57$ ) ( $p < .001$ ). On observe donc une baisse de performance au premier essai de la tâche de transfert, ainsi qu'un regain de performance lors du second essai de la tâche de transfert. En condition d'entraînement moyennement spécifique, à nouveau, les enfants font moins de mouvements en posttest 2 ( $M = 12.38$ ,  $SD = 5.60$ ) qu'en transfert 1 ( $M = 20.31$ ,  $SD = 11.32$ ) ( $p < .001$ ), et davantage de mouvements en transfert 1 qu'en transfert 2 ( $M = 8.31$ ,  $SD = 2.57$ ) ( $p < .001$ ). En condition d'entraînement non-spécifique, le même pattern que précédemment est observé, le nombre de mouvements augmentant significativement du posttest 2 ( $M = 12.04$ ,  $SD = 4.77$ ) au transfert 1 ( $M = 17.21$ ,  $SD = 6.26$ ) ( $p = .01$ ), et diminuant significativement du transfert 1 au transfert 2 ( $M = 13.13$ ,  $SD = 4.65$ ) ( $p = .02$ ).

Dans la condition sans entraînement (groupe contrôle), les enfants font moins de mouvements pour résoudre la tâche en posttest 2 ( $M = 13.72$ ,  $SD = 7.86$ ) qu'en transfert 1 ( $M = 20.79$ ,  $SD = 7.92$ ) ( $p < .001$ ). On n'observe néanmoins pas de différence significative entre le nombre de mouvements effectués en transfert 1 et en transfert 2 ( $M = 17.59$ ,  $SD = 6.67$ ), attestant d'une absence de remontée de la performance dans ce groupe contrôle.

Globalement, les résultats montrent donc une supériorité de l'entraînement hautement spécifique sur les trois autres conditions. On observe aussi, néanmoins, une baisse de performance chez tous les participants, y compris ceux ayant bénéficié de l'entraînement hautement spécifique, lors du passage de la tâche principale (posttest 2) à la tâche de transfert (transfert 1). De plus, les trois groupes de participants entraînés montrent un regain de performances dès le second essai de transfert. Ce n'est pas le cas du groupe n'ayant pas reçu d'entraînement, le nombre de mouvements n'étant pas significativement différent entre les deux essais de transfert dans ce groupe.

Par ailleurs, des analyses de corrélations ont été menées pour vérifier qu'il existe un lien entre le temps mis pour réaliser la tâche et le nombre de mouvements effectués (*cf.* Tableau 1). Pour chacun des 6 essais considérés isolément, le temps de résolution est corrélé significativement avec le nombre de mouvements, les corrélations allant de .74 à .88. De plus, les temps de résolution nécessaires à chacun des 6 essais sont globalement corrélés entre eux, avec 13 corrélations significatives et 2 corrélations non-significatives. Les corrélations entre nombres de mouvements nécessaires à chacun des 6 essais se répartissent en 8 corrélations significatives et 7 non-significatives. Enfin, il est à noter que les temps de résolution des 2 essais de transfert sont significativement corrélés entre eux et avec les temps de résolution de tous les autres essais ; les nombres de mouvements aux 2 essais de transfert sont corrélés aux nombres de mouvements de 6 autres essais, et non-corrélés aux nombres de mouvements de 3 autres essais. L'ensemble de ces résultats témoigne d'une forte cohérence entre les nombres de mouvements et les temps de résolution sur l'ensemble des essais, justifiant de centrer les analyses sur l'une seulement de ces mesures dans un souci de parcimonie.

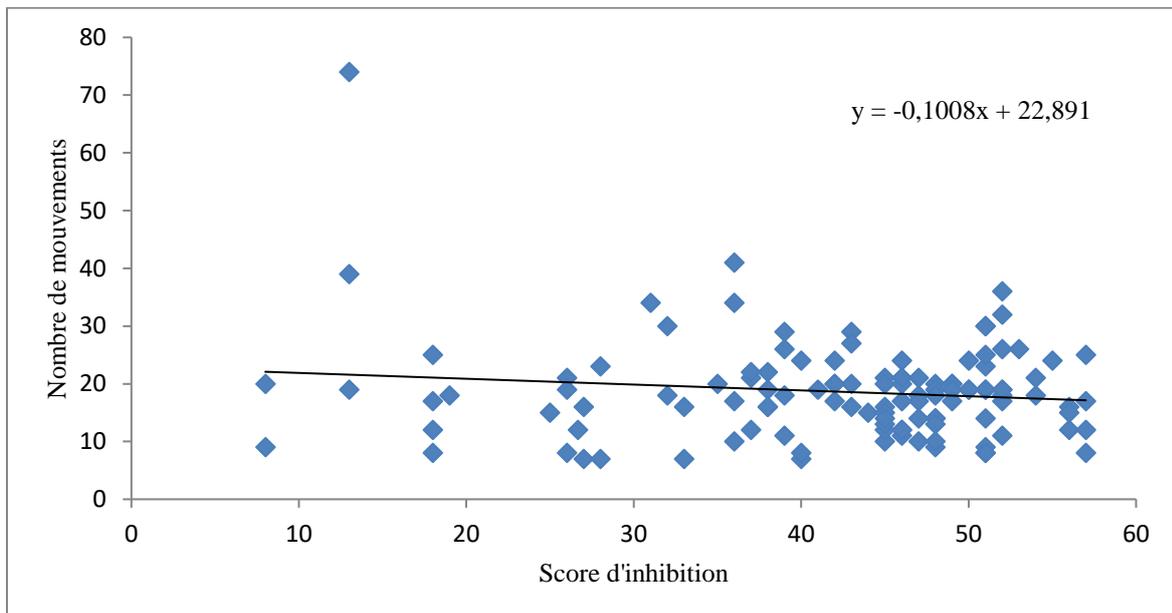
**Tableau 1.** Statistiques descriptives, corrélations des variables temps et nombre de mouvements.

Variables	M	ET	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Temps prétest 1	82.53	51.56												
2. Mouvement prétest 1	18.65	10.76	.76**											
3. Temps prétest 2	51.80	32.52	.42**	.23**										
4. Mouvement prétest 2	14.62	5.59	.43**	.42**	.81**									
5. Temps posttest 1	32.26	26.97	.03	-.09	.19*	.02								
6. Mouvement posttest 1	12.21	6.51	.34	-.04	.17	.08	.83**							
7. Temps posttest 2	26.54	24.04	.30	-.06	.29**	.09	.67**	.53**						
8. Mouvement posttest 2	11.16	5.83	-.01	-.07	.20**	.08	.56**	.54**	.88**					
9. Temps transfert 1	58.53	33.95	.25**	-.13	.35**	.19*	.24**	.19*	.34**	.25**				
10. Mouvement transfert 1	17.47	8.87	-.01	-.02	.18	.12	.19*	.27**	.29**	.36**	.74**			
11. Temps transfert 2	36.66	25.44	.24**	-.13	.31**	.08	.38**	.32**	.45**	.40**	.69**	.52**		
12. Mouvement transfert 2	12.87	6.26	.13	.072	.30**	.19**	.31**	.37**	.41**	.46**	.57**	.60**	.83**	

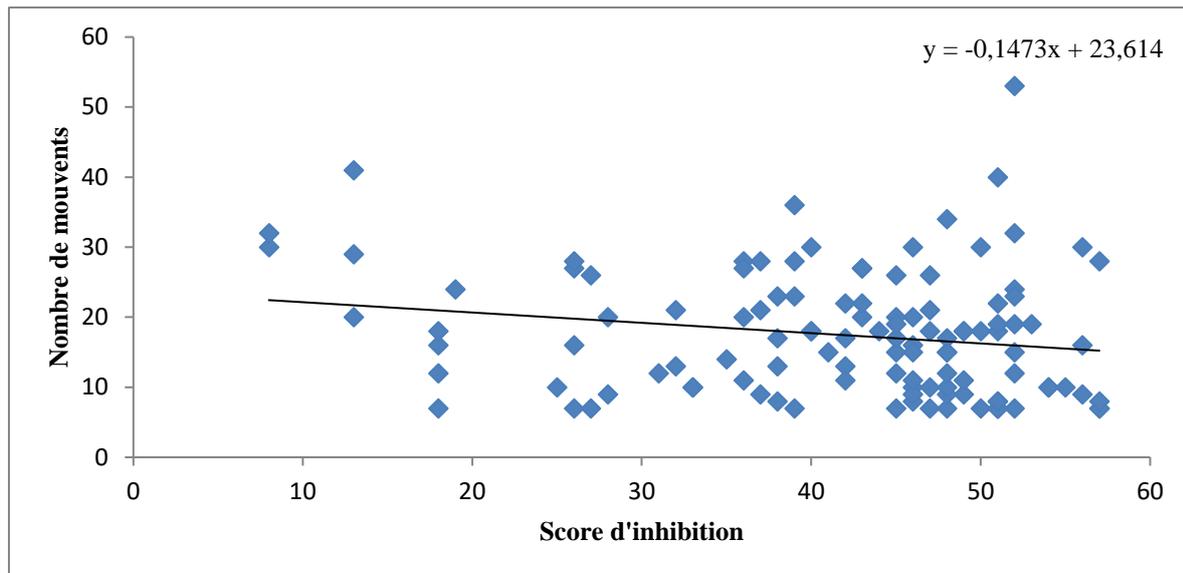
\* $p < .05$  ; \*\* $p < .001$  ; M : Moyenne ; ET : Ecart-type

### 4.3.2. Analyse des scores d'inhibition

La contribution des capacités d'inhibition à la résolution de la tâche a été testée par deux analyses de régression linéaire simples. Les résultats au test HTKS ne sont pas significativement associés à la performance au premier essai de la tâche principale  $F(1, 117) = 2.10$ ,  $\beta = -.13$ ,  $p = .15$ ,  $R^2 = .018$ . En revanche, il y a un lien significatif entre les scores au test d'inhibition et le nombre de mouvements produits au premier essai de la tâche de transfert  $F(1, 117) = 5.05$ ,  $\beta = -.20$ ,  $p = .03$ ,  $R^2 = .04$ . Ainsi, l'inhibition semble contribuer à la résolution de la tâche de transfert mais pas à la résolution de la tâche principale. Les droites de régression sont présentées dans les figures 18 et 19. Les valeurs des coefficients de régression bêtas sont négatives, ce qui montre que la pente est inversée : meilleures sont les capacités d'inhibition, moins le nombre de mouvements nécessaires pour réaliser la tâche de transfert est élevé.



**Figure 18.** Liens prédictifs entre les score d'inhibition et le nombre de mouvements à l'essai 1 de prétest.



**Figure 19.** Liens prédictifs entre les scores d'inhibition et le nombre de mouvements à l'essai 1 de transfert.

#### 4.4. Discussion

Le but de cette étude était de tester l'hypothèse d'une baisse de performances en résolution de problèmes dans le transfert numérique, ainsi que le rôle de l'entraînement et de l'inhibition cognitive dans la résistance à cette baisse. Nous faisons l'hypothèse d'une baisse de performances lors du passage à la tâche de transfert, entre différentes versions numériques de la Tour de Hanoï présentées dans des contextes numériques différents (H1). Une autre hypothèse prédisait que les enfants ayant bénéficié d'un entraînement en tâche principale devraient obtenir des performances de transfert plus élevées, et un entraînement hautement spécifique à la tâche devrait permettre une meilleure compréhension de celle-ci qu'un entraînement moyennement spécifique ou non-spécifique (H2). Nous nous attendions également à ce que la baisse de performances observée dans la tâche de transfert soit temporaire chez les enfants entraînés, la performance remontant à mesure que l'enfant s'adapte à cette nouvelle tâche grâce à l'entraînement reçu en tâche principale (H3). Une dernière hypothèse portait sur les liens entre inhibition cognitive et transfert, la baisse de performances au transfert

devant être plus marquée chez des enfants montrant des capacités d'inhibition moins élevées (H4).

En ce qui concerne la première hypothèse, les résultats montrent que le nombre de mouvements augmente du posttest 2 au transfert 1 dans toutes les conditions, validant l'hypothèse d'une chute de performances lors du passage de la tâche principale à la tâche de transfert. Ce résultat étend ceux obtenus dans des études antérieures (Clerc & Miller, 2013; Detable & Vinter, 2006; Pacton et al., 2001), et montre pour la première fois que le phénomène de baisse de performances au transfert peut s'observer entre deux versions numériques de la Tour de Hanoï présentées sur tablettes tactiles. Une explication réside dans la présence d'une dis-similarité de surface entre la forme des empilables utilisés dans les deux versions de la Tour de Hanoï, carrés en tâche principale et ronds en tâche de transfert. De nombreux travaux ont en effet montré que le transfert d'apprentissage chez des enfants est moins élevé que ce qu'on pourrait en attendre dans le cas où les tâches présentent des dis-similarités de surface (Clerc & Miller, 2013 ; Mc Neil, 2008; Nogry & Didierjean, 2007; Reed, 2012; Schwartz, Chase, Oppezzo, & Chin, 2011). Il a aussi été montré que de jeunes adultes ne parviennent pas à se référer à une règle pour catégoriser des stimuli lorsque les items donnés en exemple et les items de transfert sont perceptivement différents, la règle étant en quelque sorte enchâssée dans les items ayant servi de support à son acquisition (Thibaut, Gelaes, & Murphy, 2018). Ceci atteste qu'une dis-similarité perceptive entre deux tâches est suffisante pour faire chuter les performances des apprenants à la tâche de transfert.

La dis-similarité de surface entre les tâches se doublait d'une dis-similarité des contextes numériques de présentation des deux versions de la Tour de Hanoï. En effet, la tâche principale (Tour de Hanoï à trois carrés) avait pour contexte numérique de l'herbe, des arbres, une chèvre et une cabane, tandis que la tâche de transfert (Tour de Hanoï à trois disques) avait pour contexte numérique un mur bleu et un sol carrelé. Le modèle de Klahr et Chen (2011) prévoit que le

transfert est d'autant moins réussi que les tâches sont dis-similaires et que leurs contextes de présentation respectifs sont également dis-similaires. Considérées ensemble, ces deux types de dis-similarités semblent avoir perturbé les participants dans la réalisation de la tâche de transfert. Ceci pourrait expliquer pourquoi les résultats de cette étude diffèrent de ceux obtenus par Huber et al. (2016) et Tarasuik et al. (2017). Ces deux études ont en effet montré que le transfert d'une procédure d'action d'une version numérique de la Tour de Hanoï à trois disques à une version tangible à trois disques ne s'accompagnait pas d'une baisse de performances. Néanmoins, dans ces études, la tâche de transfert ne variait que par le support de présentation, les formes des empilables étant identiques : on peut supposer que cela permettait aux enfants d'allouer une grande partie de leurs ressources cognitives au traitement de la structure de la tâche de transfert puisqu'ils n'étaient gênés que par les différences de contexte (changement de support : 2D-3D). En revanche, dans la présente étude, les formes des empilables étaient différentes (carrés vs disques), cette différence de surface entre les tâches, de nature perceptive, étant de nature à entraver le transfert (Thibaut et al., 2010). De plus, les contextes numériques de présentation des deux tâches étaient également différents, puisque les éléments de décor environnant les tâches présentées sur l'interface graphique changeaient de la tâche principale (herbe, arbres, chèvre et cabane) à la tâche de transfert (mur bleu et sol carrelé). Nos résultats semblent ainsi confirmer la validité du modèle de Klahr et Chen (2011), la double dis-similarité des tâches et des contextes ayant fait chuter la performance lors du passage à la tâche de transfert.

La double dis-similarité des tâches et des contextes peut avoir occasionné une charge cognitive élevée, ne permettant pas aux enfants d'allouer suffisamment de ressources cognitives à la structure de résolution de la tâche (les successions de mouvements des empilables) pour transférer efficacement, et en particulier transférer, le cas échéant, les bénéfices de l'entraînement reçu. Des chercheurs soutiennent en effet que les exigences physiques que

commande la manipulation de l'écran tactile pendant la réalisation d'une tâche consomment une partie des ressources cognitives disponibles qui auraient dû permettre de traiter en profondeur la structure de la tâche. Une telle activité ne permet pas aux enfants de transférer efficacement lorsque les tâches appartiennent à des domaines différents (Aladé et al., 2016). Dans cette perspective, il est possible que l'interactivité des enfants avec l'écran tactile ait consommé une partie des ressources normalement allouées à l'apprentissage de la structure de la tâche principale, n'en n'ayant pas permis la compréhension en profondeur, et par conséquent pas non plus un transfert efficace. Des études sur le transfert numérique ont par ailleurs envisagé la présence d'une charge cognitive élevée comme un mécanisme explicatif de la difficulté des enfants à traiter les tâches numériques (Lauricella, Pempek, Barr, & Calvert, 2010; Zack et al., 2009). Ainsi, si différentes études ont montré que dans le transfert tangible la baisse de performances est occasionnée par la dis-similarité entre les tâches, dans le transfert numérique elle est peut-être également liée aux dis-similarités des éléments de décor des interfaces graphiques, celles-ci jouant le rôle de contextes numériques de présentation des tâches. De telles dis-similarités de contextes peuvent en effet jouer le rôle de distracteurs lors de la réalisation de la tâche de transfert, ce qui est compatible avec l'hypothèse selon laquelle les tâches numériques sont difficiles à réaliser pour l'enfant, car elles délivrent trop d'informations à traiter en mémoire de travail (Anderson & Pempek, 2005 ; Barr, 2013).

La baisse de performances au transfert concerne tous les participants, y compris ceux ayant bénéficié d'un entraînement hautement spécifique à la Tour de Hanoï par l'application répétée d'une procédure d'exécution de la tâche avec feedback correctif systématique. En effet, alors même que ces derniers obtiennent une performance moyenne supérieure à celle des trois autres groupes lors du premier essai de transfert, ils voient quand même le nombre de leurs mouvements augmenter significativement entre le second essai du posttest et le premier essai de transfert. Ceci indique que l'entraînement à la procédure d'exécution en tâche principale ne

semble pas avoir permis aux enfants de réappliquer cette procédure avec autant d'efficacité lors du passage à la tâche de transfert. La baisse de performances au transfert semble donc être un phénomène robuste, attesté par ailleurs par les tailles d'effet -moyenne ou forte- associées à cette baisse dans les quatre groupes d'enfants.

Concernant la deuxième hypothèse, les résultats montrent qu'au premier essai de transfert, les enfants ayant bénéficié d'un entraînement réalisent la tâche en un nombre de mouvements significativement inférieur au nombre de mouvements des enfants dans les trois autres conditions. Il n'y avait pas de différences entre les autres conditions, ce qui valide partiellement notre hypothèse. En effet, la baisse de performances au transfert est moins marquée dans la condition d'entraînement hautement spécifique, en accord avec l'hypothèse selon laquelle entraîner un individu à la tâche principale lui permet d'abstraire le principe de résolution pour le ré-appliquer dans la tâche de transfert de manière adaptée (Didierjean, 2001). Néanmoins, bien que la ré-application de la procédure d'exécution se soit faite de manière correcte dans la tâche de transfert chez ces enfants, même l'entraînement hautement spécifique n'a pas permis d'éviter la baisse de performance au transfert. Ce résultat converge avec ceux d'études antérieures montrant une difficulté de jeunes enfants à transférer efficacement une stratégie cognitive (Clerc & Miller, 2013 ; Clerc et al., 2017, 2021), y compris après entraînement (Bjorklund, Miller, Coyle, & Slawinski, 1997).

De plus, la baisse de performance observée lors du passage à la tâche de transfert dans cette étude ne peut pas s'expliquer par une différence dans les niveaux de difficulté des deux tâches. En effet, les performances ne sont pas significativement différentes entre le premier essai de la tâche principale et le premier essai de la tâche de transfert. Au contraire, les résultats montrent que cette performance augmente de façon continue lors des 4 essais de la tâche principale (du premier essai de prétest au second essai de posttest), et qu'elle chute au premier essai de la tâche de transfert au cours duquel elle revient à son niveau initial c'est-à-dire celui

du premier essai de prétest. En somme, si l'entraînement, en particulier hautement spécifique, s'est révélé efficace en permettant une augmentation de performances en tâche principale, le passage à la tâche de transfert a fait perdre aux participants ce bénéfice de l'entraînement, au moins temporairement. Ce retour au niveau de performances initial, qui traduit la disparition de l'effet bénéfique de l'entraînement, pourrait s'expliquer par la difficulté à s'adapter à la tâche de transfert. L'adaptation à la tâche de transfert a été relevée comme une des raisons pouvant expliquer la difficulté du transfert (Clerc et al., 2014; Nokes, 2009), en même temps que comme un processus inévitable dans le transfert d'apprentissage (Schwartz et al., 2012). La présence conjointe de dis-similarités des tâches et des contextes numériques a sans doute pesé lourd dans la nécessaire adaptation à la tâche de transfert.

Concernant la troisième hypothèse, les résultats obtenus montrent que les performances des enfants ré-augmentent entre le premier essai de la tâche et le second essai de la tâche de transfert, chez les enfants ayant reçu un entraînement mais pas chez les enfants non-entraînés, ce qui valide l'hypothèse. Les études antérieures qui se sont intéressées à la baisse de performances en tâche de transfert n'ont pas testé l'hypothèse d'une ré-augmentation de performances après la baisse initiale. C'est le cas dans l'étude de Schiff et Vakil (2015) qui ont montré une baisse de performances entre deux variantes de la Tour de Hanoï à trois disques présentées sur un support numérique. Dans leur étude, bien que les performances aient chuté lors du passage du dernier essai d'une variante (déplacement des disques de A vers C) à l'essai de transfert dans une seconde variante (déplacement des disques de C vers A), les enfants n'ont pas réalisé un second essai de transfert, ce qui aurait permis de voir si leurs performances ré-augmentaient. Les résultats obtenus dans notre étude sont cohérents avec ceux de Schiff et Vakil (2015) et les prolongent, en même temps qu'ils attestent de l'utilité d'un entraînement pour favoriser le transfert en Tour de Hanoï. Des chercheurs ont proposé l'hypothèse selon laquelle, lorsque les enfants sont confrontés à une tâche de transfert, les incertitudes nées des différences

avec la tâche principale pourraient causer une baisse de performances. Cette baisse proviendrait en particulier d'une diminution du montant de ressources cognitives disponibles pour effectuer la tâche de transfert, une partie des ressources cognitives étant plutôt allouée à des processus métacognitifs de traitement des incertitudes liées aux différences entre tâches (Clerc et al., 2014; Clerc & Clément, 2016). Le traitement de l'incertitude est connu pour poser des difficultés durables aux enfants (Lyons & Ghetti, 2013).

On peut faire l'hypothèse que dans notre étude, la baisse de performances au premier essai de la tâche de transfert a laissé place à un regain de performances au second essai, du fait de la disparition des incertitudes accompagnant la répétition des essais. Un tel pattern est compatible avec des études précédentes sur la Tour de Hanoï chez l'enfant, qui ont montré l'existence de deux phases. La première phase consiste en une exploration de la tâche afin de conceptualiser les séquences d'actions. La deuxième phase consiste en une planification des séquences d'action afin d'en faciliter l'exécution (Clément, 2001; Kanellaki-Agathos & Richard, 1997). Il se peut que lors du premier essai de transfert, les enfants préalablement entraînés, quel que soit le degré de spécificité de l'entraînement reçu, aient exploré la tâche de transfert afin de déterminer si les séquences d'actions à appliquer sont identiques à celles de la tâche principale : une telle exploration, renforcée par les incertitudes liées au changement de tâche, peut amener l'enfant à produire des séquences d'actions erronées, faisant chuter la performance au premier essai de transfert. Dans le second essai de transfert, se basant sur son exploration lors de l'essai précédent, l'enfant a pu planifier ses séquences d'actions de manière plus efficace, faisant par là-même remonter la performance à la tâche. Une telle hypothèse est en l'état pure conjecture. De futures études pourraient nous permettre de mieux comprendre les raisons de la baisse de performances suivie d'un regain rapide, en augmentant le nombre d'essais de la tâche de transfert afin de savoir si le regain de performances est définitif ou si d'autres phases de baisse surviennent. Les performances de transfert de stratégie en résolution

de problèmes chez l'enfant ne suivent en effet pas toujours un pattern linéaire, des baisses pouvant alterner avec des hausses de performances (Chen & Klahr, 1999).

Notre dernière hypothèse traitait des liens entre inhibition et transfert numérique. Les résultats montrent que meilleures sont les capacités d'inhibition, moins le nombre de mouvements nécessaires pour effectuer le premier essai de la tâche de transfert est élevé, validant l'hypothèse. L'inhibition cognitive, et en particulier la dimension de contrôle des interférences, semble donc avoir joué un rôle dans les performances de transfert numérique. Des études ont montré que des enfants de 6 ans peuvent éprouver des difficultés à résister aux interférences (Ikeda et al., 2013; Thibaut et al., 2010), et un niveau d'inhibition cognitive moins élevé a été proposé pour expliquer la baisse de performance au transfert chez de jeunes enfants (Clerc et al., 2017; Suddendorf, 2003). Comme mentionné plus haut, les dis-similarités entre tâches et entre contextes numériques de présentation des tâches ont pu être source d'interférences, entre la tâche principale et la tâche de transfert. De plus, pour les participants des groupes ayant reçu un entraînement moyennement spécifique ou non-spécifique, peuvent s'être ajoutées des interférences dues aux différences de règles associées aux essais d'entraînement, règles différentes de celles de la Tour de Hanoï. Les participants ont donc probablement été soumis à des interférences à plusieurs niveaux, conformément au modèle de Diamond (2013). Il est possible que les enfants ayant mieux résisté aux différentes interférences aient pu allouer davantage de ressources à la réalisation de la tâche de transfert et ainsi obtenir de meilleures performances dans cette tâche. Ceci tendrait à montrer que les capacités d'inhibition sont particulièrement impliquées dans le transfert numérique. Les résultats de cette étude relevant sur ce point d'une analyse de régression, il est difficile de conclure sans ambiguïté sur le rôle causal de l'inhibition cognitive dans la résistance à la baisse de performances au transfert. De futures études devront traiter cette question de manière plus directe afin de tester l'implication causale de l'inhibition dans le transfert.

## 4.5. Conclusion

Cette étude montre que le phénomène de baisse de performances au transfert est observable dans le transfert numérique entre deux versions isomorphes de la Tour de Hanoï chez l'enfant, ce qui à notre connaissance n'avait pas encore été montré. Ceci indique que dans une certaine mesure, les processus régissant le transfert d'apprentissage en résolution de problème semblent être les mêmes en présentation numérique que dans le cas de tâches tangibles. Un entraînement à la tâche et de bonnes capacités d'inhibition cognitive semblent par ailleurs pouvoir être bénéfiques. Chez les enfants entraînés, cette baisse était limitée au premier essai de transfert et la performance s'est améliorée dès le second essai de transfert, peut-être sous l'effet de processus métacognitifs aidant l'enfant à mieux s'adapter à la tâche de transfert en réduisant les incertitudes. Enfin, la possibilité offerte par l'avènement des outils numériques pourrait permettre de manipuler facilement à la fois les tâches et leurs supports de présentation.

---

## **CHAPITRE 5 : ETUDE 2. TRANSFERT D'APPRENTISSAGE ENTRE VERSIONS NUMERIQUE ET TANGIBLE DE LA TOUR DE HANOÏ CHEZ L'ENFANT : SIMILARITE DES SUPPORTS ET RÔLE DE L'INHIBITION COGNITIVE**

---

### **5.1. Objectifs**

Le premier objectif de cette étude est de tester le transfert d'apprentissage dans la tâche de la Tour de Hanoï, entre deux tâches isomorphes présentées soit avec le même support (tangible-tangible ou numérique-numérique), soit avec des supports différents (tangible-numérique ou numérique-tangible). En effet, l'efficacité du transfert est régie par la loi des similarités (Klahr & Chen, 2011), permettant de distinguer le *near transfer* du *far transfer* selon la distance symbolique entre les tâches (Barnett & Ceci, 2002), ainsi qu'entre les supports de présentation (tangible vs numérique, Moser et al., 2015). Néanmoins certains chercheurs soutiennent que les tablettes numériques ont un effet positif sur les apprentissages scolaires (voir Haßer et al., 2016, pour une revue). De ce point de vue, on peut se demander d'une part si cet effet positif est également observé avec une tâche de résolution de problème. D'autre part, la tablette numérique est-elle, dans l'absolu, bénéfique pour le transfert, ou ce dernier reste-t-il soumis à la loi des similarités indépendamment du support numérique d'apprentissage ? Si c'est la loi des similarités qui s'applique indépendamment du support numérique d'apprentissage, des différences de surface de type perceptif, même minimes, sont susceptibles d'entraver le transfert (Thibaut et al., 2010) et in fine de provoquer une baisse de performances. Ainsi, en répliquant l'étude de Huber et al. (2016), mais en remplaçant, en tâche principale, les empilables « disque » par des empilables « carré », on peut faire l'hypothèse d'une baisse de performances entre les deux versions de la Tour de Hanoï (H1). Au regard des résultats montrant un regain de performances dans la première étude, nous faisons aussi l'hypothèse que cette baisse serait visible au premier essai de transfert mais serait suivie d'un regain de performances dès le

deuxième essai de transfert (H2). De plus, en référence au modèle de Klahr et Chen (2011), on s'attend à ce que la baisse de performances soit moins marquée lorsque les deux tâches sont similaires présentées dans des supports identiques (numérique-numérique, tangible-tangible) (H3).

Le deuxième objectif de cette étude est de répliquer l'effet prédictif de l'inhibition sur le transfert numérique, observé dans la première étude. Dans ce sens, on prévoit que la baisse de performances au transfert sera plus marquée chez les enfants montrant des capacités d'inhibition moins élevées (H4). Dans cette deuxième étude, nous utiliserons un autre test d'inhibition que celui utilisé dans l'étude 1, à savoir le test d'inhibition cognitive Day and Night (Gerstadt et al., 1994). Ce test a été choisi pour cette étude parce qu'elle a été réalisée auprès d'enfants gabonais. Or, le Gabon comporte plusieurs langues maternelles dont la pratique influence la compréhension du français, français qui est la langue d'enseignement dont l'usage crée chez les enfants le besoin d'inhiber leurs langues maternelles pour suivre en classe (Gheloube, 2007). Ainsi, nous avons pensé que les enfants éprouveraient moins de difficultés à réaliser la tâche d'inhibition lorsque la consigne est suivie d'une image comme avec le Day and Night, que lorsque la consigne n'est pas suivie d'image comme avec le HTKS. Par ailleurs, ces deux tâches consistent toutes deux à produire une réponse antagoniste à la suite d'une commande verbale, en retenant la réponse dominante (e.g., toucher la tête quand on lui demande de toucher ses pieds dans le "HTKS", dire "jour" quand on lui présente une carte représentant la lune dans le "Day and Night"). Elles sont donc comparables sur ce point. Elles relèvent par ailleurs toutes deux du contrôle inhibiteur (Diamond, 2013).

## **5.2. Méthode**

### **5.2.1. Participants**

Cent trois enfants ( $M_{\text{âge}} = 6\text{ans } 7\text{mois}$ ,  $SD_{\text{âge}} = .45$  ; 51 garçons) fréquentant deux écoles primaires d'une agglomération librevilloise (Gabon) ont participé à cette étude. Selon les

informations délivrées par les parents et les enseignants, aucun enfant ne présentait de signes de développement atypique ou de troubles cognitifs ou des apprentissages.

### **5.2.2. Matériel**

Différentes versions de la Tour de Hanoï étaient présentées soit sur une tablette tactile de marque *acer Iconia One 10 B3-A40-K2AM* (taille de l'écran résolution 1280×800, longueur 258 mm, largeur 167,5 mm, hauteur 9,15 mm), soit à l'aide d'objets en bois.

#### **Tâche**

La tâche utilisée dans cette étude est la Tour de Hanoï à trois empilables telle que déjà décrite dans la première étude. Néanmoins, pour cette étude, quatre versions ont été utilisées : deux versions numériques (à trois carrés ; à trois disques) et deux versions tangibles (à trois carrés ; à trois disques). Nous ne présenterons ici que les versions tangibles, car les versions numériques sont les mêmes que dans la première étude.

#### ***La version tangible de la Tour de Hanoï à trois carrés***

Cette tâche a été construite pour les besoins de l'expérimentation. Elle est constituée de trois carrés de tailles et de couleurs différentes (petit : 5,5 cm, jaune ; moyen : 7,5 cm, marron ; grand : 9,5 cm, vert), et trois emplacements rectangulaires (largeur 15 cm ; longueur, 17 cm) alignés horizontalement sur une planche.



**Figure 20.** Version tangible de la Tour de Hanoï à trois carrés.

### ***La version tangible de la Tour de Hanoï à trois disques***

Elle est constituée de trois disques de tailles et de couleurs différentes (petit : diamètre 2 cm, vert ; moyen : diamètre 3 cm, marron ; grand : diamètre 4 cm, jaune) et d'une planchette (longueur, 20 cm, largeur, 7,5 cm) surmontée de trois tiges (hauteur : 9 cm). Les tiges ont à leurs sommets des couleurs différentes correspondant chacune à la couleur de chaque disque, le but étant de créer des distracteurs perceptifs comme dans la version numérique de la Tour de Hanoï à trois disques.

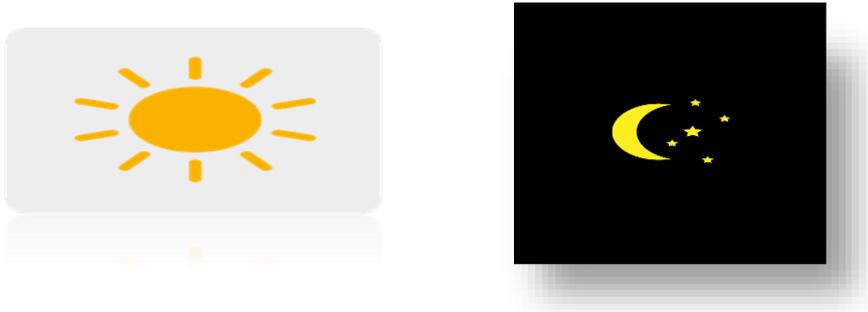


**Figure 21.** Version tangible de la Tour de Hanoï à trois disques.

### ***Le test inhibition Day and Night (Gerstadt, Hong, & Diamond, 1994)***

C'est un test de suppression de la réponse dominante. Il contient deux types de cartes, représentant soit la lune soit le soleil. Dans une première phase, six cartes (trois cartes « soleil » et trois cartes « lune ») sont alignées sur la table dans un ordre aléatoire, face cachée. La première carte est retournée par l'expérimentateur et l'enfant doit fournir la réponse verbale associée, « jour » si la carte représente le soleil et « nuit » si elle représente la lune. La carte est alors reposée face cachée puis la deuxième est dévoilée, et ainsi de suite jusqu'à la sixième carte. Dans la deuxième phase, l'enfant doit inhiber la réponse verbale associée à la carte et fournir la réponse verbale antagoniste. Ainsi, il doit prononcer « jour » quand la carte représente la lune et « nuit » quand elle représente le soleil. Cette phase commence par deux essais d'entraînement (un « jour » et un « nuit »), au cours desquels, si l'enfant hésite,

l'expérimentateur le relance une fois en lui disant : « que dois-tu dire pour cette carte-ci ? ». Les cartes sont ensuite présentées vingt-six fois, une par une dans un ordre aléatoire (50% « jour »). Le score est de 1 point par réponse correcte et 0 pour une réponse erronée (score maximum 26). Des scores élevés indiquent une forte capacité d'inhibition.



**Figure 22.** Cartes du test d'inhibition Day and Night.

### 5.2.3. Procédure

Les enfants ont été rencontrés individuellement dans une salle au sein de leur école, deux jours de suite. Le matin du premier jour, l'enfant était invité à réaliser la Tour de Hanoï à trois carrés (tâche principale), sur support tangible ou sur support numérique. L'après-midi même, il devait réaliser la Tour de Hanoï à trois disques (tâche de transfert), sur le support tangible ou sur le support numérique. Quatre conditions expérimentales ont été créées, selon le support utilisé en tâche principale et en tâche de transfert, deux conditions intégrées et deux conditions croisées. Les deux conditions intégrées étaient définies par le fait que la tâche principale et la tâche de transfert étaient présentées sur le même support : numérique-numérique ou tangible-tangible (*near transfer*). Les deux conditions croisées étaient définies par le fait que la tâche principale et la tâche de transfert étaient présentées sur un support différent : numérique-tangible ou tangible-numérique (*far transfer*). Les participants ont été affectés aléatoirement à l'une des quatre conditions.

Le matin du deuxième jour, l'enfant réalisait le test d'inhibition.

***Tâche principale : Tour de Hanoï à trois carrés***

L'enfant était assis, et sur la table devant lui était posé le dispositif de la Tour de Hanoï à trois carrés, soit en bois (support tangible), soit présenté sur la tablette numérique (support numérique). Pour s'assurer de la compréhension des règles par les enfants, ainsi qu'obtenir une mesure de base de leurs performances, un essai d'apprentissage était coréalisé entre l'expérimentateur et le participant (Richard, 1982). Pour ce faire, l'expérimentateur fournissait les règles tout en faisant la démonstration d'un mouvement autorisé (« Tu ne peux déplacer qu'un carré à la fois », l'expérimentateur déplace alors le petit carré sur l'emplacement le plus à droite) ; puis d'un mouvement non-autorisé (« Tu ne peux pas mettre un grand carré sur un plus petit », l'expérimentateur déplace alors le carré moyen sur le petit, puis remet le carré moyen à son emplacement initial). L'enfant était alors invité à poursuivre l'essai jusqu'au bout. Dans la version numérique, un feedback était fourni par la tablette numérique au participant à chaque fois que celui-ci enfreignait une règle (carré automatiquement renvoyé à son emplacement précédent), assorti d'une explication de la part de l'expérimentateur (e.g., « le carré est renvoyé parce qu'on ne met pas un grand carré sur un plus petit »). Pour la version tangible, un feedback était fourni par l'expérimentateur quand l'enfant enfreignait une règle (l'expérimentateur replaçait le carré à son emplacement précédent) et la règle lui était rappelée (e.g., « je remets le carré où il était, car on ne met pas un grand carré sur un plus petit ». Le participant devait ensuite effectuer seul quatre essais, sans pause.

***Tâche de transfert : Tour de Hanoï à trois disques***

L'enfant effectuait la Tour de Hanoï à trois disques, sans entraînement préalable et sans qu'il soit fait mention de la Tour de Hanoï à trois carrés réalisée le matin. De nouveau, soit la version en bois (support tangible) soit la version sur tablette (support numérique) était proposée. L'expérimentateur expliquait les règles à l'enfant. Dans la version tangible, si l'enfant

enfrenait une règle, l'expérimentateur replaçait le disque à son emplacement précédent sans fournir d'explication. Dans la version numérique, si l'enfant enfrenait une règle, le disque était automatiquement renvoyé à son emplacement précédent et l'expérimentateur ne fournissait pas d'explication. L'enfant devait réaliser quatre essais sans pause.

### 5.3. Résultats

Chaque enfant était affecté dans l'une des quatre conditions, intégrée numérique ( $n = 27$ ,  $M_{\text{âge}} = 6.69$ ,  $SD_{\text{âge}} = .40$ ), intégrée tangible ( $n = 24$ ,  $M_{\text{âge}} = 6.86$ ,  $SD_{\text{âge}} = .41$ ), croisée numérique/tangible ( $n = 24$ ,  $M_{\text{âge}} = 6.78$ ,  $SD_{\text{âge}} = .50$ ) et croisée tangible/numérique ( $n = 28$ ,  $M_{\text{âge}} = 6.67$ ,  $SD_{\text{âge}} = .38$ ). Il n'y a pas de différence significative entre les moyennes d'âge des quatre groupes  $F(3, 99) = 1.11$ ,  $p = .351$ ,  $\eta^2p = .032$ .

Pour toutes les versions de la Tour de Hanoï, le nombre total de mouvements nécessaires à la résolution de la tâche a été calculé. Pour les mêmes raisons que celles évoquées dans la première étude, nous n'avons pas analysé les temps de résolution. Néanmoins, nous présentons les corrélations entre le nombre de mouvements et le temps mis pour résoudre la tâche (cf. Tableau 2). Nous présentons ci-dessous les performances aux tâches principales (4 essais) et de transfert (4 essais). Les résultats ont été traités par analyse de variance, et des comparaisons planifiées ont été effectuées pour localiser les sources des différences significatives.

#### 5.3.1. Analyse des mouvements

Une Anova à mesures mixtes 8 (essais, intrasujet) \* 4 (similarité de supports, intersujet) a été effectuée sur le nombre de mouvements produits. L'effet principal du facteur essai est significatif,  $F(7, 693) = 54.45$ ,  $p < .001$   $\eta^2p = .36$ . Globalement, la performance augmente de l'essai 1 ( $M = 27.34$ ,  $SD = 12.14$ ) à l'essai 4 ( $M = 14.28$ ,  $SD = 7.49$ ), chute de l'essai 4 à l'essai 5 ( $M = 28.16$ ,  $SD = 12.32$ ), puis augmente à nouveau de l'essai 5 à l'essai 8 ( $M = 14.06$ ,  $SD = 8.70$ ) (cf. Figure 23). La baisse de performances lors du passage à la tâche de transfert, c'est-à-

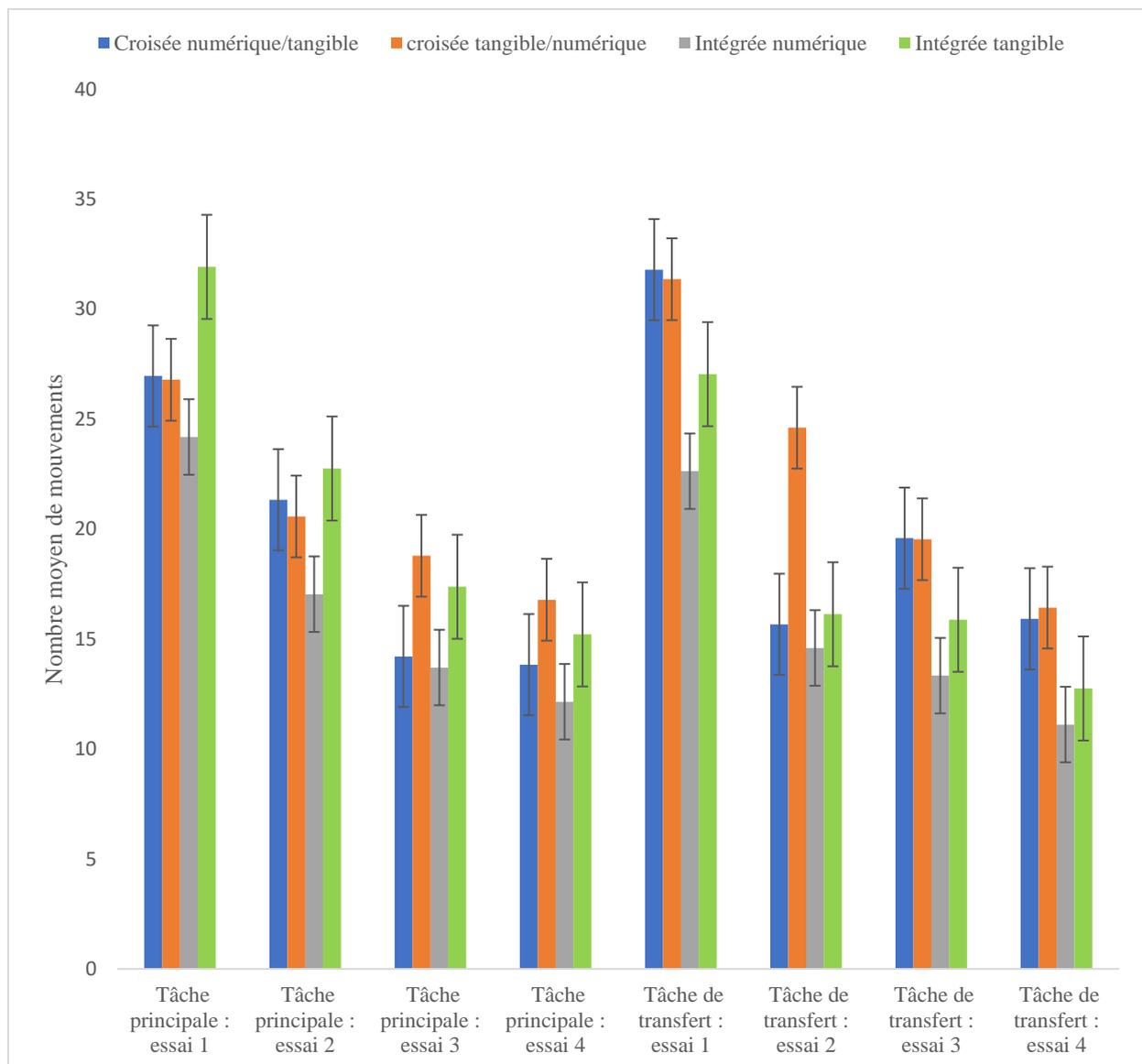
dire entre le dernier essai de la tâche principale (essai 4) et le premier essai de la tâche de transfert (essai 5), est significative ( $p < .001$ ). Pour vérifier l'hypothèse d'un regain de performance, les essais de transfert ont été comparés entre eux. Les enfants font significativement moins de mouvements pour effectuer le deuxième essai de transfert ( $M = 17.92$ ,  $SD = 8.83$ ) que le premier ( $p < .001$ ). La performance n'est pas significativement différente entre le deuxième essai de transfert et le troisième essai de transfert ( $M = 19.54$ ,  $SD = 12.75$ ). Elle augmente significativement du troisième essai de transfert au quatrième essai de transfert ( $M = 14.06$ ,  $SD = 8.70$ ) ( $p < .001$ ), traduisant un nouveau regain de performance.

L'effet principal du facteur similarité de supports est significatif,  $F(3, 99) = 3.61$ ,  $p < .016$ ,  $\eta^2p = .09$ . Le nombre de mouvements en condition intégrée numérique ( $M = 15.89$ ,  $SD = 7.86$ ) est significativement inférieur à celui en condition croisée tangible/numérique ( $M = 21.98$ ,  $SD = 11.28$ ), ( $p = .006$ ), les autres différences ne sont pas significatives. Ainsi, pour réaliser la Tour de Hanoï numérique en tâche de transfert (trois disques) après l'avoir exécuté en tâche principale (trois carrés), il est préférable de l'avoir exécuté au support numérique en tâche principale. L'effet d'interaction essai \* similarité de supports est significatif,  $F(21, 693) = 2.20$ ,  $p = .002$ ,  $\eta^2p = .06$ . Des comparaisons planifiées entre les conditions ont été effectuées à chaque essai de la tâche principale. Il n'y a pas de différences significatives entre les groupes à tous les essais de la tâche principale, ce qui suggère que les quatre conditions de réalisation de la Tour de Hanoï étaient de difficulté équivalente en tâche principale.

Afin de tester l'hypothèse d'une supériorité des conditions intégrées sur les conditions croisées sur les performances de transfert, nous avons comparé, à chaque essai de transfert, les résultats obtenus dans chacune des 4 conditions.

Au premier essai de transfert, les enfants en condition intégrée numérique ( $M = 22.63$ ,  $SD = 9.33$ ) font moins de mouvements que les enfants dans les conditions croisées numérique/tangible ( $M = 31.80$   $SD = 15.54$ ) ( $p < .001$ ) et tangible/numérique ( $M = 31.36$ ,  $SD$

= 11.81) ( $p < .001$ ). Les autres différences ne sont pas significatives, et en particulier la différence avec la condition intégrée tangible-tangible. Au deuxième essai de transfert, les enfants en condition croisée tangible/numérique ( $M = 24.61$ ,  $SD = 11.61$ ) font plus de mouvements que leurs pairs en condition croisée numérique/tangible ( $M = 24.61$ ,  $SD = 11.61$ ) ( $p < .001$ ), en condition intégrée tangible ( $M = 16.13$ ,  $SD = 4.80$ ) ( $p < .001$ ), ainsi qu'en condition intégrée numérique ( $M = 14.60$ ,  $SD = 6.87$ ) ( $p < .001$ ). Les autres différences ne sont pas significatives. Les différences entre les conditions ne sont pas significatives au troisième essai de transfert, ni au quatrième essai de transfert.



**Figure 23.** Nombre moyen de mouvements à chaque essai en fonction du type de support. Les barres d'erreur représentent les erreurs-types.

Comme dans l'étude 1, des analyses de corrélations ont été menées pour voir s'il existe un lien entre le temps mis pour réaliser la tâche et le nombre de mouvements effectués (cf. Tableau 2). A chaque essai, le temps de résolution est positivement corrélé avec le nombre de mouvements effectués, corrélations allant de .76 à .92. De plus, les temps de résolution à chacun des 8 essais sont corrélés entre eux, avec seulement 1 corrélation non-significative contre 27 corrélations significatives. Les résultats sont les mêmes pour le nombre de mouvements, avec également 1 corrélation non significative contre 27 corrélations significatives. La corrélation non-significative pour le temps de résolution est observée entre l'essai 2 de prétest et l'essai 1 de transfert. En ce qui concerne le nombre de mouvements, la corrélation non-significative est observée entre l'essai 1 de prétest et l'essai 2 de transfert. Pris ensemble, ces résultats montrent une forte cohérence entre les nombres de mouvements et les temps de résolution sur l'ensemble des essais. Dans ce sens, par souci de parcimonie, nous avons fait le choix d'effectuer nos analyses sur une seule mesure, en l'occurrence le nombre de mouvements.

**Tableau 2.** Statistiques descriptives, corrélations des variables temps et nombre de mouvements.

Variabes	M	ET	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1. TP : Temps 1	83.47	43.52																
2. TP : Mouvement 1	27.34	12.14	.76**															
3. TP : Temps 2	53.61	34.47	.66**	.54**														
4. TP : Mouvement 2	20.33	9.26	.63**	.58**	.90**													
5. TP : Temps 3	32.95	22.01	.38**	.40**	.48**	.47**												
6. TP : Mouvement 3	15.98	9.14	.38**	.39**	.45**	.51**	.85**											
7. TP : Temps 4	28.49	20.83	.34**	.36**	.48**	.45**	.85**	.79**										
8. TP : Mouvement 4	14.51	7.32	.39**	.35**	.53**	.54**	.78**	.82**	.90**									
9. TT : Temps 1	70.04	32.88	.21*	.26**	.18	.24*	.43**	.45**	.35**	.40**								
10. TT : Mouvement 1	28.17	12.32	.19*	.25**	.14	.21*	.37**	.40**	.32**	.42**	.83**							
11. TT : Temps 2	44.93	25.19	.22*	.14	.24**	.29**	.33**	.44**	.36**	.43**	.63**	.61**						
12. TT : Mouvement 2	17.92	8.83	.18	.13	.20*	.25**	.28**	.44**	.34**	.42**	.46**	.53**	.84**					
13. TT : Temps 3	37.83	26.27	.35**	.39**	.4**	.43**	.42**	.45**	.36**	.35**	.44**	.40**	.58**	.51**				
14. TT : Mouvement 3	17.07	11.35	.32**	.35**	.379**	.42**	.39**	.45**	.35**	.38**	.45**	.43**	.60**	.54**	.95**			
15. TT : Temps 4	30.23	21.86	.28**	.42**	.29**	.39**	.33**	.38**	.29**	.30**	.40**	.37**	.50**	.47**	.79**	.81**		
16. TT : Mouvement 4	14.06	8.70	.20**	.28**	.22*	.31**	.27**	.33**	.26**	.27**	.40**	.40**	.55**	.51**	.77**	.80**	.92**	

\*p< .05 ; \*\*p< .001 ; M : Moyenne ; ET : Ecart-type ; TP : Tâche Principale ; TT : Tâche de Transfert

### 5.3.2. Analyse des scores d'inhibition

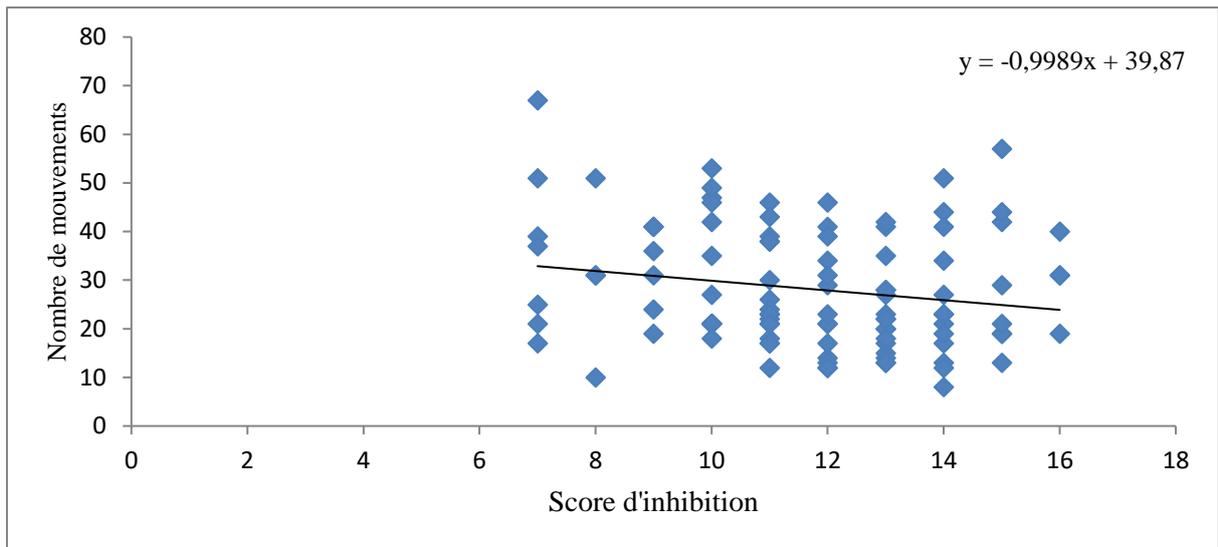
La contribution des capacités d'inhibition cognitive aux performances en tâche de transfert a été testée par des analyses de régression linéaire simple à chaque essai de transfert. La performance de transfert est la performance moyennée sur les 4 conditions de similarité. Les résultats au test Day and Night sont significativement associés à la performance à tous les essais de transfert (tendance significative pour le premier essai), et uniquement au deuxième essai de la tâche principale (*cf.* tableau 3 et 4). Les droites de régression concernant les essais de la tâche de transfert sont présentées dans les figures 24, 25, 26, 27. Les pentes sont inversées, ce qui montre que meilleures sont les capacités d'inhibition, moins le nombre de mouvements nécessaires pour réaliser la tâche de transfert est élevé, ce qui valide l'hypothèse.

**Tableau 3.** Effet prédictif de l'inhibition sur le nombre de mouvements aux essais de transfert.

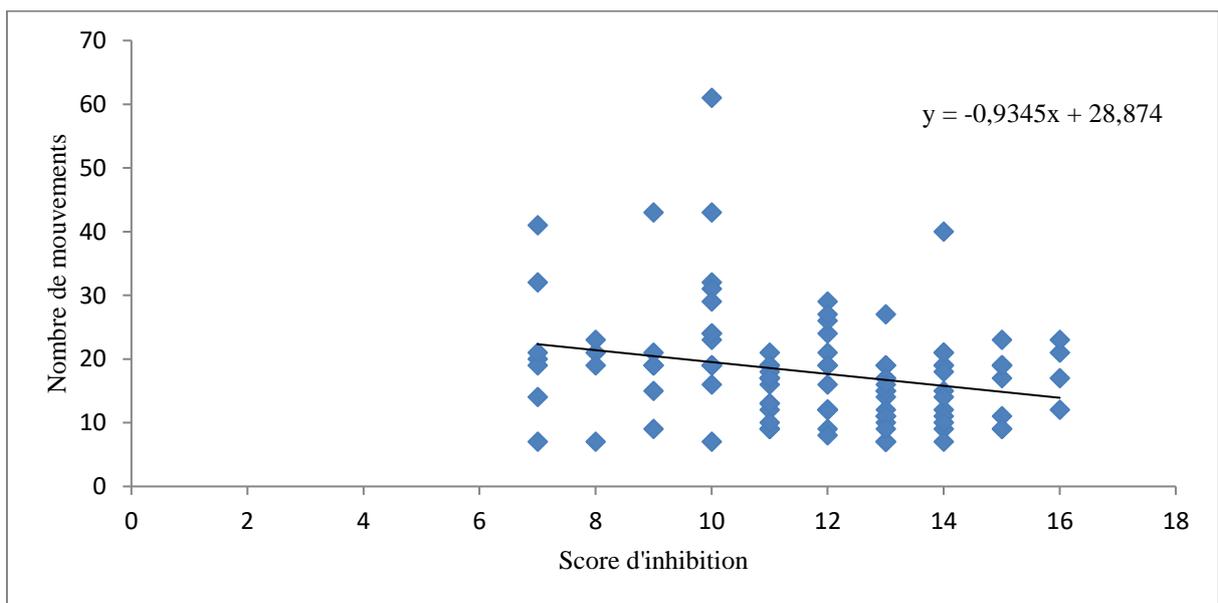
	Bêta	R <sup>2</sup>	F	p
Essai 1	-.19	.04	3.77	.053
Essai 2	-.25	.06	6.60	.012
Essai 3	-.40	.40	18.64	.001
Essai 4	-.50	.24	33.49	.001

**Tableau 4.** Effet prédictif de l'inhibition sur le nombre de mouvements aux essais de la tâche principale.

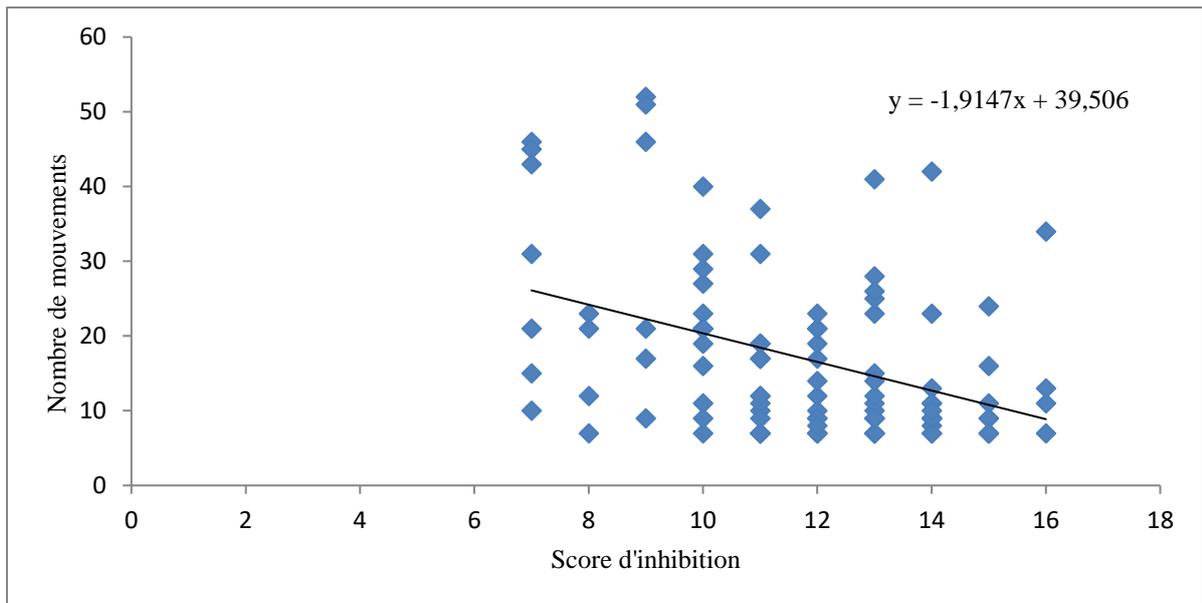
	Bêta	R <sup>2</sup>	F	p
Essai 1	-.15	.01	2.21	.15
Essai 2	-.21	.04	4.68	.033
Essai 3	-.12	.02	1.54	.22
Essai 4	-.12	.02	1.86	.18



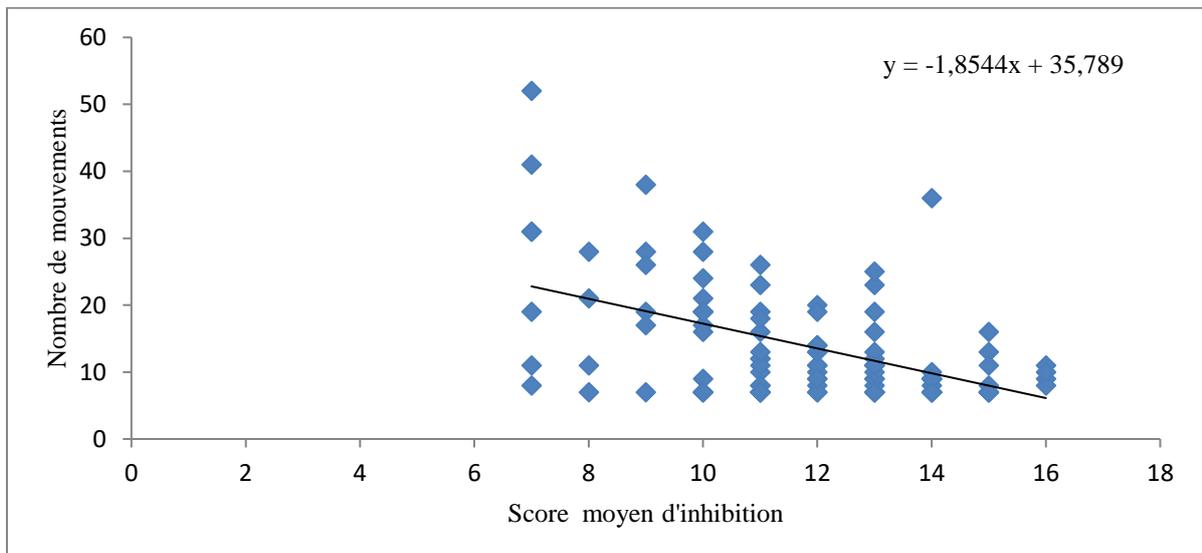
**Figure 24.** Liens prédictifs entre les scores d'inhibition et le nombre de mouvements à l'essai 1 de transfert.



**Figure 25.** Liens prédictifs entre les scores d'inhibition et le de mouvements à l'essai 2 de transfert.



**Figure 26.** Liens prédictifs entre les scores d'inhibition et le nombre de mouvements à l'essai 3 de transfert.



**Figure 27.** Liens prédictifs entre les scores d'inhibition et le nombre de mouvements à l'essai 4 de transfert.

## 5.4. Discussion

Cette étude avait pour objectif de tester l'effet de la similarité conjointe des tâches et des supports sur la résistance à la baisse de performances au transfert, ainsi que la contribution de l'inhibition cognitive dans la résistance à cette baisse. Une première hypothèse était qu'une baisse de performances serait observée entre différentes versions de la Tour de Hanoï présentées sur des supports différents (H1). Nous envisagions dans une deuxième hypothèse que les enfants manifesteraient un regain de performances dès le deuxième essai de transfert (H2). Dans une troisième hypothèse, nous prédisions que la performance en tâche de transfert serait plus élevée chez les enfants dans les conditions avec des supports de présentation identiques (conditions intégrées) par rapport aux enfants dans les conditions comprenant des supports de présentation différents (conditions croisées) (H3). En dernier lieu, nous nous attendions à des liens entre inhibition cognitive et transfert numérique, prédisant une baisse de performances moins marquée chez des enfants qui montrent des capacités d'inhibition élevées (H4).

Concernant notre première hypothèse, les résultats montrent que le nombre de mouvements nécessaire à la résolution de la tâche augmente du quatrième essai de la tâche principale au premier essai de la tâche de transfert dans toutes les conditions, validant ainsi l'hypothèse d'une baisse de performances lors du passage de la tâche principale à la tâche de transfert. Ce résultat est cohérent avec ceux déjà obtenus dans notre première étude, ainsi que dans des études antérieures portant sur des domaines de connaissance variés utilisant des tâches tangibles (Adi-Japha & Brestel, 2020; Clerc & Miller, 2013; Detable & Vinter, 2006; Pacton et al., 2001), et entre deux configurations de la Tour de Hanoï présentées en versions numériques (Schiff & Vakil, 2015). Ce résultat peut s'expliquer dans le cadre de la théorie de la charge cognitive. En effet, la théorie de la charge cognitive soutient que celle-ci correspond à la quantité de ressources cognitives allouées en fonction de la tâche à résoudre (Chanquoy et al.,

2007). Il y aurait un effet de dissociation de l'attention lorsqu'il y a des sources d'informations multiples à traiter (Tricot, 1998), comme c'est le cas dans cette étude.

La Tour de Hanoï exige que le participant se souvienne en permanence des règles pour planifier les mouvements avant de les effectuer. Le maintien permanent des règles en mémoire de travail, la planification et la prise de décision du mouvement à effectuer, nécessitent un effort cognitif conséquent de la part de l'enfant (Klahr & Robinson, 1981). En plus des exigences de la tâche elle-même, en tâche de transfert, les enfants avaient à traiter la forme des empilables (disques) qui sont perceptivement différents des empilables de la tâche principale. Pour cela, la tâche de transfert pouvait être cognitivement coûteuse pour l'apprenant, obligé de partager ses ressources cognitives entre le traitement de la tâche elle-même (structure de résolution) et la forme des nouveaux empilables (habillage de surface). Ce traitement supplémentaire de la forme de ces empilables peut avoir occasionné une charge cognitive extrinsèque qui gêne l'apprentissage (Bellec & Tricot, 2013) et dans le cadre de cette étude, semble avoir contribué à faire chuter les performances des enfants. Il se peut donc également que les ressources cognitives nécessaires à la résolution de la tâche de transfert (maintien des règles en MDT, planification, exécution des mouvements) aient été partagées entre le traitement de ces éléments de structure de la tâche et le traitement des nouveaux éléments de surface (forme des empilables). Cela ne permettrait pas un traitement efficace de la structure même de la tâche et appliquer efficacement le principe de résolution, ce qui a conduit à une chute de la performance.

Notre seconde hypothèse était celle d'un regain de performance au fil des essais de la tâche de transfert. Comme déjà mentionné dans la première étude, la nouveauté des éléments de surface de la tâche de transfert peut avoir créé des incertitudes chez les enfants, consommant une partie des ressources cognitives disponibles et faisant baisser la performance. Si tel est le cas, on pouvait s'attendre à un regain de performances dès le deuxième essai de transfert. Les résultats de cette étude montrent que les performances des enfants ré-augmentent entre le

premier essai de la tâche de transfert et le deuxième essai de la tâche de transfert. Ce regain de performances se maintient au troisième essai et s'accroît au quatrième, ce qui étend les résultats de la première étude ayant montré un regain de performances au second essai. Un tel résultat pourrait s'expliquer par la dissipation des incertitudes et la compréhension de la tâche au fil des essais. Au premier essai de transfert, les incertitudes peuvent avoir conduit les enfants à effectuer des mouvements erronés qui se traduisent par une baisse de performances. Le premier essai de transfert a probablement servi de phase exploratoire aux enfants. Il a par exemple été récemment montré que l'incertitude dans la résolution d'un problème, prédit la réussite du transfert. L'incertitude conduirait les enfants à s'engager dans la tâche, à persister et par là, à traiter la tâche en profondeur (Lamnina & Chase, 2021). Si tel est le cas, du fait de leurs incertitudes, au premier essai, les enfants n'ont probablement fait que traiter en profondeur la tâche. Puis, au deuxième essai, il est possible que par des processus métacognitifs, les enfants aient repéré les similarités avec la tâche principale, ce qui a pu conduire à une planification et une exécution efficace de leurs mouvements, faisant ainsi remonter leurs performances. Dans cette perspective, des futures recherches pourraient inclure une mesure de la métacognition et d'incertitude afin de voir leurs effets sur le transfert d'apprentissage, et particulièrement le transfert avec les outils numériques.

Au fil des essais, en résolvant la même tâche, il est également possible que la charge cognitive liée aux exigences de la tâche ait baissé. Milla, Bakhshipour, Bodt et Getchell (2019) ont par exemple montré chez des jeunes adultes, qu'au fur et à mesure qu'ils résolvaient des variantes de la Tour de Hanoï, une diminution des efforts était observée, attestée par une utilisation plus efficace des ressources neuronales. Dans notre étude, il se pourrait qu'aux deuxième et troisième essais de la tâche de transfert, les enfants aient appris à mieux planifier leurs actions, et qu'au quatrième essai de transfert ils aient utilisé une quantité de ressources

moins importante pour planifier les actions, allouant ainsi plus de ressources à leur exécution et par là, augmentant leurs performances.

Notre troisième hypothèse prévoyait de meilleures performances de transfert dans les deux conditions intégrées que dans les deux conditions croisées. Bien qu'une baisse de performances soit observée chez tous les participants au premier essai de transfert, les enfants dans la condition intégrée numérique font significativement moins de mouvements que les enfants dans les deux conditions croisées. En revanche, les performances des enfants dans les deux conditions croisées ne sont pas différentes de celles des enfants dans la condition intégrée tangible, ne validant ainsi notre troisième hypothèse que partiellement. Dans les deux conditions croisées, la tâche de transfert est présentée, soit sous un support tangible, soit sous un support numérique, selon que la tâche principale soit présentée sous l'un ou l'autre des supports. Or, selon le modèle de Klahr et Chen (2011), la probabilité de réussir le transfert est faible lorsque les tâches sont dis-similaires, ainsi que leurs contextes de présentation respectifs (*far transfer*). Dans cette étude, la dis-similarité de surface entre les tâches se doublait d'une dis-similarité de supports de présentation dans les conditions croisées, les supports de présentation jouant le rôle de contextes de présentation des deux versions de la Tour de Hanoï (Barnett & Ceci, 2002; Moser et al., 2015). Cette dis-similarité conjointe des tâches et des supports a probablement perturbé davantage les enfants dans les conditions croisées au cours de la réalisation de la tâche de transfert, contrairement aux enfants dans la condition intégrée numérique, validant le modèle de Klahr et Chen (2011).

En plus des nouveaux éléments de surface, un changement de support de présentation de la tâche de transfert a sans doute conduit à un traitement supplémentaire des propriétés perceptives des empilables dans ces conditions. Conformément à la théorie de la charge cognitive (Sweller, 1994), ce traitement supplémentaire peut avoir causé une consommation d'une partie des ressources cognitives normalement consacrées à la charge cognitive essentielle

telle que définie par Chanquoy et al. (2007). Une faible quantité de ressources dédiée à la charge cognitive essentielle ne permet pas en effet de traiter la tâche en profondeur, et dans le cas présent la structure de la tâche de transfert. De plus, un nouveau support de présentation constitue un nouveau matériel à traiter, dont l'intégration mentale et le sens qui lui est conféré sont cognitivement coûteux (Tricot, 1998). Ceci n'aurait donc pas permis aux enfants d'allouer suffisamment de ressources cognitives pour traiter la structure de la tâche de transfert et déceler la similarité avec la tâche principale, pour transférer efficacement. Par exemple, Zack et al. (2013) ont montré que l'ajout d'indices linguistiques spécifiques en tâche de transfert crée un traitement supplémentaire et occasionne une charge cognitive, interférant ainsi avec l'activité de transfert chez les jeunes enfants de 15 à 16 mois. Les résultats obtenus dans cette deuxième étude de thèse étendent donc ceux déjà observés chez des enfants plus jeunes, montrant une baisse de performances lorsqu'un changement de support se produit (Moser et al., 2015; Zack et al., 2009; Zack et al., 2013).

Par ailleurs, au-delà de la supériorité des conditions intégrées sur les conditions croisées, les deux conditions croisées sont elles-mêmes différentes l'une de l'autre, en termes d'efficacité sur le transfert. L'avantage de l'apprentissage, en tâche principale, de la version numérique de la Tour de Hanoï, s'observe en particulier au deuxième essai de transfert. En effet, à cet essai, les performances des enfants qui ont appris à résoudre la tâche en support numérique et ont transféré dans la tâche présentée au support tangible, sont significativement meilleures que celles des enfants qui ont appris à résoudre la tâche dans le support tangible et transféré dans la tâche numérique. Ceci montre que le transfert d'un apprentissage du numérique vers le tangible peut représenter une condition plus favorable au transfert que l'inverse (du tangible vers le numérique). En effet, les performances des enfants en conditions intégrées et celles des enfants en condition croisée numérique/tangible diffèrent toutes de celles des enfants dans la condition croisée tangible/numérique. Cette dernière condition est celle qui a permis les moins

bonnes performances de transfert. Ce résultat est cohérent avec ceux de Huber et al. (2016) et de Tarasuik et al. (2017), qui ont montré que les enfants qui ont appris à résoudre la Tour de Hanoï en version numérique avaient les mêmes performances que les enfants ayant appris à résoudre cette tâche en version tangible, lorsqu'ils réalisaient tous la version tangible en tâche de transfert. Néanmoins, ces études n'ayant pas étudié la qualité du transfert dans la condition tangible-numérique (« 3D-2D » pour reprendre les termes des auteurs) et fait varier la forme des empilables, il était difficile de conclure sur l'efficacité de la tablette sur la réalisation de la Tour de Hanoï. Notre étude apporte donc une information supplémentaire sur le transfert entre versions numérique et tangible de la Tour de Hanoï. Elle a montré que lorsque les formes des empilables sont différentes entre les deux tâches, le transfert s'accompagne d'une baisse de performances. Néanmoins, cette baisse de performances est amoindrie lorsque le transfert s'effectue d'une version numérique à une version tangible plutôt que lorsqu'il s'effectue d'une version tangible à une version numérique.

Aux troisième et quatrième essais de transfert, les résultats obtenus dans cette étude montrent qu'il n'y a pas de différence entre les différentes conditions, tous les enfants obtenant des performances équivalentes. Une explication possible est qu'au fil des essais, chaque groupe d'enfants acquiert progressivement la maîtrise de la tâche, ce qui réduit au fur et à mesure la charge cognitive, et par là-même l'écart des performances entre les groupes. En effet, du fait que le transfert numérique sollicite plusieurs entités cognitives (e.g., représentation symbolique, encodage des propriétés perceptives du matériel etc.), il limite les capacités cognitives de l'enfant et augmente de ce fait la charge cognitive (Barr, 2013). Cependant, par répétition des essais, il est possible que les enfants soient parvenus à approfondir la compréhension de la tâche de transfert, consommant ainsi au fil des essais, moins de ressources cognitives.

En bref, il est moins difficile pour l'enfant d'apprendre à résoudre la Tour de Hanoï sur la tablette numérique puis de transférer vers une autre version, que d'apprendre sur un support

tangible et transférer dans une version numérique. Cette efficacité de la tablette tactile sur la réalisation de la Tour de Hanoï avait déjà été montrée dans des études antérieures chez les jeunes adultes, soutenant que la version tangible de la Tour de Hanoï est plus consommatrice de ressources cognitives que la version numérique (Milla et al., 2019; Robinson & Brewer, 2016). Les résultats de notre étude ont montré néanmoins que cette supériorité de la tablette numérique sur le support tangible n'est observable que lorsque le support de présentation de la tâche principale et celui de la tâche de transfert sont identiques (Barnett & Ceci, 2002). De plus, cette efficacité s'est dissipée au fur et à mesure que les enfants réalisaient la tâche de transfert. De futures études pourraient chercher à mieux comprendre cette efficacité de la tablette dans l'acquisition et le transfert des apprentissages, ainsi que l'apport de la similarité de contextes (supports) en utilisant d'autres tâches que la Tour de Hanoï et/ou d'autres contextes de présentation. Ceci permettrait non seulement de tester la validité du modèle de Klahr et Chen (2011), mais aussi d'apporter des réponses sur l'intérêt de l'utilisation de la tablette dans les apprentissages à l'école (Hirsh-Pasek et al., 2015; Mayer, 2016).

Notre dernière hypothèse portait sur la contribution de l'inhibition cognitive au transfert numérique. Les analyses de régression ont montré un lien entre inhibition cognitive et performances de transfert. Meilleures sont les capacités d'inhibition, moins le nombre de mouvements nécessaires pour réaliser la tâche de transfert est élevé, ce qui valide l'hypothèse. Néanmoins, on observe déjà un lien entre les scores d'inhibition et le nombre de mouvements au deuxième essai de la tâche principale. Ce lien est probablement dû aux nombreux échecs constatés dans le premier essai. En effet, au premier essai de la tâche principale, il est possible que les enfants se soient engagés dans la tâche, sans se contrôler, et encore plus avec les tâches numériques. Ainsi, ayant probablement constaté la difficulté de la tâche, au deuxième essai, ils se sont contrôlés. Au regard des liens non significatifs entre l'inhibition et la suite des essais de la tâche principale, il est possible que les enfants, après s'être contrôlés au deuxième essai, aient

automatisé la procédure de résolution. Ceci expliquerait pourquoi l'inhibition n'est pas impliquée dans la résolution de ces essais 3 et 4 de la tâche principale.

En revanche, dans la tâche de transfert, bien qu'au premier essai on observe un lien tendanciel, l'inhibition prédit significativement la performance à tous les essais. Le modèle de Richard et al. (1993) soutient que la résolution de la Tour de Hanoï met en conflit des contraintes implicites que s'impose le résolveur et les contraintes explicites que commande la tâche. Le résolveur devra alors résoudre ce conflit cognitif pour effectuer la tâche efficacement, en inhibant les mouvements illégaux qu'il peut se permettre lorsqu'il est dans une situation d'impasse à cause des différentes contraintes implicites qu'il s'impose spontanément, et selon la construction de l'espace problème. Il est possible aussi que ce conflit inhérent à la Tour de Hanoï ait été accentué par la dis-similarité des tâches, les nombreuses informations traitées en mémoire de travail ayant probablement perturbé la compréhension qu'ont les enfants de la tâche de transfert, compréhension pourtant indispensable pour réaliser la tâche. Pour traiter la tâche de transfert, il était nécessaire d'inhiber les informations inappropriées, et en particulier les propriétés perceptives des nouveaux empilables

En outre, pour les participants dans les conditions croisées, ont pu s'ajouter des interférences dues à la dis-similarité des supports, occasionnant des traitements supplémentaires : les enfants devaient inhiber plusieurs informations et à différents niveaux, conformément au modèle de Diamond (2013). Probablement, les enfants qui ont pu inhiber efficacement ce flux d'informations ont pu allouer davantage de ressources au traitement de la structure de la tâche de transfert, et ont de ce fait transféré plus efficacement la procédure de résolution. De tels résultats suggèrent que l'inhibition cognitive est impliquée dans le transfert numérique. Cependant, comme dans l'étude 1, il est difficile de conclure fermement sur le rôle causal de l'inhibition du fait du protocole expérimental et des analyses réalisées (régression).

D'autres recherches doivent encore être menées en testant directement l'implication causale de l'inhibition dans le transfert numérique.

## **5.5. Conclusion**

Les résultats obtenus dans cette étude confirment ceux de l'étude 1, en montrant que la baisse de performances au transfert est observable chez les enfants dans le transfert numérique de la Tour de Hanoï. Il semble que les versions numérique et tangibles de la Tour de Hanoï sollicitent des processus cognitifs en partie identiques, qui seraient responsables de cette baisse de performances au transfert, par ailleurs rapportée à de nombreuses reprises dans la littérature. On observe par ailleurs une baisse de performances au transfert dans toutes les conditions, ce qui confirme les résultats obtenus déjà dans de nombreuses études antérieures ayant montré une baisse de performances chez des enfants plus jeunes dans le transfert numérique (Moser et al., 2015; Strouse & Ganea, 2017; Zack et al., 2009, 2013). Néanmoins, cette baisse de performances au transfert était moins marquée chez les enfants dans les conditions intégrées, et ce d'autant moins dans la condition intégrée numérique. Ceci montre que l'apprentissage sur des écrans tactiles ne suffit certes pas pour garantir à tout coup un transfert efficace, mais que le transfert est particulièrement préservé lorsqu'il intervient entre deux tâches numériques tactiles plutôt qu'entre une tâche principale numérique et une tâche de transfert tangible. Ceci confirme également le fait que lorsque les tâches ainsi que les contextes sont similaires, les enfants résistent mieux à la baisse de performances au transfert (Klahr & Chen, 2011).

Toutefois, les performances de tous les enfants ré-augmentent au deuxième et au troisième essai de transfert. L'explication de ce regain de performances pourrait être liée aux incertitudes des enfants et aux processus métacognitifs qui permettent aux enfants de progressivement s'adapter à la tâche de transfert (Clerc et al., 2014). Ainsi, si la similarité des tâches ainsi que des supports, et de bonnes capacités d'inhibition cognitive, paraissent bénéfiques aux enfants pour faire face à la baisse de performances, il est possible que de bonnes

capacités métacognitives soient quant à elles bénéfiques pour un regain rapide. Métacognition et fonctions exécutives partagent de nombreux points communs chez les jeunes enfants et il se pourrait que les enfants obtenant les scores d'inhibition cognitive les plus élevés soient également les plus performants dans des tâches métacognitives (Roebbers, 2017). Ces enfants pourraient alors montrer les meilleures performances de transfert, combinant à la fois une réduction de la baisse de performances au premier essai de transfert et un regain plus rapide de la performance aux essais de transfert subséquents. De futures études pourraient investiguer cette question.

Pour terminer, dans cette étude, nous avons examiné les situations de *near* et de *far transfer* en opérationnalisant le concept de contexte (d'apprentissage ou de transfert) par les supports de présentation des tâches. Nous avons fait varier les supports et les tâches, mais ce paradigme ne nous a pas permis de tester directement le modèle de Klahr et Chen (2011). En effet, si nous avons pu créer des conditions de similarité des contextes (numérique/numérique ou tangible/tangible) et dis-similarité des contextes (numérique/tangible ou tangible/numérique), nous n'avons pas pu créer les autres situations de transfert décrites dans le modèle de Klahr et Chen (2011) : similarité forte des tâches et similarité forte des contextes, similarité forte des tâches et similarité faible des contextes, et similarité faible des tâches et similarité faible des contextes. Or, le support de présentation numérique permet d'implémenter plusieurs contextes d'apprentissage, au sens des éléments de décor environnant la tâche présentée sur l'interface graphique, tel que nous l'avons défini au chapitre 1. Ainsi, pour tester directement le modèle de Klahr et Chen (2011), il serait intéressant pour les études à venir de concevoir des tâches numériques présentées sur des interférences graphiques contenant des éléments de décor différents. Ces éléments de décor incarneront les contextes d'apprentissage dans lesquelles seront présentées les tâches. Ceci permettrait de faire varier à la fois le degré de

similarités des tâches elles-mêmes et le degré de similarité de leurs contextes numériques de présentation.

---

## CHAPITRE 6 : ETUDE 3. TRANSFERT NUMERIQUE CHEZ L'ENFANT : SIMILARITE DES TACHES ET DES INTERFACES GRAPHIQUES, ET CONTRIBUTION DE L'INHIBITION COGNITIVE

---

### 6.1. Objectifs

Le premier objectif de cette étude est de chercher à savoir si la similarité conjointe des tâches et des contextes peut faciliter le transfert d'apprentissage chez l'enfant, dans la tâche de Tour de Hanoï. Ceci revient à tester la validité du modèle de Klahr et Chen (2011), seul modèle du transfert d'apprentissage prenant en compte à la fois les deux types de similarité. Nous l'avons vu dans le chapitre 1, dans le cas des tablettes numériques, les éléments de décor environnant la tâche présentée sur l'interface graphique constituent un contexte numérique. Une même tâche proposée sur une même tablette peut donc bénéficier de plusieurs contextes de présentation différents. Ceci permet d'étudier le transfert entre deux versions isomorphes de la Tour de Hanoï, présentées toutes deux sur une même tablette tactile et dans des contextes numériques différents. Dans la présente étude, nous allons donc faire varier les contextes numériques, présents sur les interfaces graphiques de présentation des tâches, en modifiant les éléments de décor présents à l'écran d'une tâche à l'autre. Ainsi, conformément au modèle de Klahr et Chen (2011) et aux résultats obtenus dans les deux premières études, nous faisons l'hypothèse (H1) d'une baisse de performances au transfert, entre différentes versions numériques de la Tour de Hanoï (tâches isomorphes) présentant une double dis-similarité de surface et de contexte (*far transfer*). Cette baisse de performances serait amoindrie, voire absente, entre les versions présentant des similarités de surface ainsi que de contexte (*near transfer*) (H2). De même, nous attendons à ce que cette baisse de performances soit moins marquée entre les versions présentant, soit des similarités de surface mais des dis-similarités de contexte, soit des dis-similarités de surface mais des similarités de contexte, par rapport à une situation de transfert caractérisée par des dis-similarités conjointes de surface et de contexte

(H3). De plus, nous prédisons que la baisse de performances observée lors du passage de la tâche principale à la tâche de transfert sera temporaire, la performance des enfants remontant à mesure que l'enfant s'adapte à cette nouvelle tâche grâce à l'exploration de la tâche de transfert au premier essai (H4).

Enfin, nous chercherons à vérifier que le contrôle inhibiteur contribue à la réussite du transfert numérique à la Tour de Hanoï chez l'enfant (H5). Une fois de plus, on s'attend à ce que les performances au transfert soient moins bonnes chez des enfants montrant des faibles capacités d'inhibition.

## **6.2. Méthode**

### **6.2.1. Participants**

Cent quatre enfants ( $M_{\text{âge}} = 6.5$  ans,  $SD_{\text{âge}} = .39$  ; 54 filles) dont cinquante-quatre Gabonais et cinquante Français, ont participé à cette étude. Ils étaient tous scolarisés et selon les informations délivrées par les parents et les enseignants, aucun enfant ne présentait de signes de développement atypique ou de troubles cognitifs ou des apprentissages. L'étude a reçu un avis favorable du Comité d'Éthique pour les Recherches Grenoble Alpes (Protocole N° 2020-01-28-3, cf. Annexe 3).

### **6.2.2. Matériel**

Nous nous sommes servis de la même tablette numérique que celle utilisée pour les deux premières études. De même nous avons utilisé la tâche de Tour de Hanoï telle que décrite dans les études ci-dessus. Néanmoins, pour cette étude, nous avons utilisé trois versions numériques (une version à trois disques, une à trois rectangles et une à trois trapèzes). Ces trois versions peuvent être présentées dans trois contextes numériques différents, que nous avons fait varier selon les différentes conditions de l'expérimentation : le contexte 1 renferme des arbustes, une verdure bosselée et un ciel en arrière-plan ; le contexte 2 renferme des cocotiers, un sable

bosselé et des cailloux, la mer et le soleil ; le contexte 3 renferme une ville et un ciel nuageux. L'ensemble est présenté via une application qui a été développée spécifiquement pour les besoins d'expérimentation de cette thèse, par deux étudiants en Master Mathématiques et Informatique Appliquées aux Sciences Humaines et Sociales (MIASHS) de l'Université Grenoble Alpes en 2018-2019.

Conformément au modèle de Klahr et Chen (2011), nous utiliserons quatre conditions expérimentales, définies par des degrés faibles vs élevés de similarité des tâches et des degrés faibles vs élevés de similarité des contextes. Sur le plan perceptif, la forme rectangulaire est plus proche de celle du trapèze que de celle du disque (*cf.* Figure 28). Le degré de similarité des tâches est donc opérationnalisé en termes perceptifs, la tour de Hanoï à trois rectangles étant plus similaire à la Tour de Hanoï à trois trapèzes qu'à la Tour de Hanoï à trois disques.



**Figure 28.** Copie d'écran des trois versions de la Tour de Hanoï numérique présentées dans les trois contextes numériques, avec de gauche à droite les trapèzes présentés dans le contexte « cocotiers », les rectangles présentés dans le contexte « arbustes », les disques présentés dans le contexte « maisons ».

La forme des empilables a été prétestée auprès de cinq enfants âgés de 6 ans et cinq adolescents âgés de 13 ans. L'expérimentateur leur a présenté les trois tâches et leur a demandé : « parmi ces trois tâches, lesquelles se ressemblent le plus ? montre les. » Trois des cinq enfants et quatre des cinq adolescents ont estimé que les trapèzes et les rectangles se ressemblaient le plus.

De plus, les arbustes étant sémantiquement plus similaires aux cocotiers qu'aux maisons, le degré de similarité des contextes numériques porte sur une dimension sémantique, le contexte 1 (arbustes) étant plus similaire au contexte 2 (cocotiers) qu'au contexte 3 (maisons).

Les quatre conditions expérimentales utilisées sont :

- Similarité forte des tâches, similarité forte des contextes. Tâche principale Tour de Hanoï à trois rectangles, contexte 1. Tâche de transfert : Tour de Hanoï à trois trapèzes, contexte 2.
- Similarité forte des tâches, similarité faible des contextes. Tâche principale Tour de Hanoï à trois rectangles, contexte 1. Tâche de transfert : Tour de Hanoï à trois trapèzes, contexte 3.
- Similarité faible des tâches, similarité forte des contextes. Tâche principale Tour de Hanoï à trois rectangles, contexte 1. Tâche de transfert : Tour de Hanoï à trois disques, contexte 2.
- Similarité faible des tâches, similarité faible des contextes. Tâche principale : Tour de Hanoï à trois rectangles, contexte 1. Tâche de transfert : Tour de Hanoï à trois disques, contexte 3.

Les mesures d'inhibition ont été recueillies à l'aide des tests HTKS (Ponitz et al., 2009) et Day and Night (Gerstadt et al., 1994), tels que présentés respectivement dans les deux premières études. Pour cette étude, en accord avec le modèle de Diamond (2013), il nous a paru intéressant d'utiliser conjointement ces deux tests de mesure du contrôle inhibiteur, car l'un mesure l'inhibition de réponse comportementale (HTKS) et l'autre mesure le contrôle de l'interférence et en particulier l'inhibition cognitive (Day and Night). Le but est ici de chercher à savoir si, au sein du contrôle inhibiteur, les processus d'inhibition de la réponse comportementale et d'inhibition cognitive sont tous deux impliqués dans le transfert numérique, et si oui dans quelle mesure.

Par ailleurs, pour contrôler le niveau d'intelligence générale des enfants, nous avons utilisé les Matrices Progressives de Raven Couleur (PM47). Il s'agit d'un test de facteur g largement utilisé, qui présente l'avantage d'être relativement indépendant des aspects culturels,

et de ce fait nous a paru approprié au vu de l'échantillon bi-national. Au plan théorique, intelligence et résolution de problèmes (e.g., Tour de Hanoï) sont à la fois considérés par certains chercheurs comme deux processus distincts et par d'autres comme deux processus identiques (voir Stadler, Becker, Gödker, Leutner, & Greiff, 2015, pour une méta-analyse). Nous avons donc pris des mesures de l'intelligence pour nous affranchir des éventuels effets de l'intelligence sur la réalisation de la Tour de Hanoï dans l'interprétation des résultats recueillis.

### **6.2.3. Procédure**

Tous les enfants étaient rencontrés individuellement, dans leur école pendant les heures de classe, hors récréation. Pour les quatre tâches numériques, le participant était assis sur une chaise, avec devant lui une table sur laquelle était posée la tablette numérique. L'expérimentateur était assis sur une chaise à droite du participant. L'étude s'est déroulée en quatre phases comprenant une phase d'apprentissage (tâche principale), une phase de transfert (tâche de transfert), une phase consacrée à l'évaluation des capacités d'inhibition (HTKS et Day and Night) et une dernière phase consacrée à l'évaluation de l'intelligence (PM47).

La tâche principale était présentée en matinée, et son déroulement était identique au prétest de la première étude. Quatre essais devaient être effectués, sans pause.

La tâche de transfert était présentée l'après-midi même. Les enfants étaient invités à réaliser la tâche en quatre essais consécutifs, sans explications en cas d'erreurs. Dans les tâches principales et de transfert, la tablette fournissait aux enfants un feedback correctif lorsqu'ils violaient une règle.

Pour éviter une surcharge cognitive, les deux tests d'inhibition étaient administrés à un jour d'intervalle chacun, un jour après la tâche de transfert.

Un jour séparait également la phase d'inhibition de la phase d'évaluation du facteur g. L'administration des PM47 se déroulait de la façon suivante. L'enfant était assis sur une chaise, les feuilles de passation posées face contre table. L'expérimentateur était assis en face de lui.

Ce dernier montrait à l'enfant la première feuille (A1) et lui expliquait le but de la tâche : « Tu vois de quoi il s'agit ? En haut, il y a grand dessin, mais il manque un morceau. En dessous, toutes les figures ont la même forme que le morceau qui manque, mais il n'y a qu'un morceau qui complète bien le grand dessin. Peux-tu me montrer lequel ? ». S'il ne parvenait pas, l'expérimentateur lui montrait et lui expliquait. Puis, il présentait les autres matrices qu'il devait compléter en désignant seulement le chiffre de la figure appropriée. Il y avait trois séries de 12 matrices chacune (A ; AB ; B), chaque réponse correcte rapportant 1 point.

### 6.3. Résultats

Chaque enfant était affecté dans l'une des quatre conditions, similarité faible des tâches/similarité faible des contextes ( $n = 26$ , 14 enfants gabonais,  $M$  âge = 6.5 ans,  $SD = .40$ ), similarité faible des tâches/similarité forte des contextes ( $n = 27$ , 13 enfants français,  $M$  âge = 6.53 ans,  $SD = .41$ ), similarité forte des tâches/similarité faible des contextes ( $n = 25$ , 13 enfants gabonais,  $M$  âge = 6.57 ans,  $SD = .38$ ), similarité forte des tâches/similarité forte des contextes ( $n = 26$ , 13 enfants français,  $M$  âge = 6.53 ans,  $SD = .40$ ). Il n'y a pas de différence de moyennes d'âge entre les groupes  $F(3, 100) = .15, p = .93$ .

Pour s'assurer qu'il n'y avait pas de différence dans les niveaux d'inhibition et d'intelligence des deux sous-échantillons, nous avons réalisé des analyses de variance univariées sur le facteur nationalité. Les enfants français vs gabonais ne présentent pas de différences significatives dans le niveau d'inhibition, ni au test Day and Night,  $F(1, 102) = 2.24, p = .14, \eta^2p = .02$ , ni au test HTKS,  $F(1, 102) = .41, p = .52, \eta^2p = .04$ . Les niveaux d'intelligence mesurés par les PM47 ne diffèrent pas non plus significativement entre les deux sous-groupes,  $F(1, 102) = 3.48, p = .07, \eta^2p = .03$ . Pour cette raison, le facteur nationalité n'a pas été intégré dans les analyses suivantes.

Schiff et Vakil (2015) ont mesuré la planification à l'aide du temps mis entre la présentation de la tâche à l'écran et le premier mouvement opéré par l'enfant. Dans la présente

étude, nous avons également utilisé cette mesure dans une analyse préliminaire à celle des mouvements. Nous ne prenons cette mesure que dans cette étude et pas dans les deux précédentes, parce que c'est après les deux premières études qu'avec l'aide des deux étudiants de Master MIASHS nous avons pu développer un dispositif numérique nous permettant de recueillir ce temps entre présentation de la tâche et premier mouvement opéré par l'enfant (cf. partie « matériel » ci-dessus). La tablette numérique étant un outil attrayant qui favorise l'engagement de l'enfant dans la tâche, nous avons pris cette mesure pour voir si avec les tablettes numériques, les enfants planifient les mouvements avant de s'engager dans la tâche ou s'ils s'engagent directement dans celle-ci sans prendre le temps de planifier les mouvements. De plus, cette mesure fournit une explication possible aux performances à la Tour de Hanoï au fur et à mesure des essais. Une Anova à mesures mixtes 8 (essais, intrasujet) \* 4 (degrés de similarité, intersujet) a été menée sur le temps de résolution entre la présentation de la tâche à l'écran et le premier mouvement opéré par l'enfant. Les résultats montrent qu'il n'y a pas d'effet significatif du facteur essai  $F(7, 700) = 1.19, p = .306, \eta^2p = .01$ , ni du facteur degré de similarité  $F(3, 100) = .56, p = .65, \eta^2p = .02$ . Pour cette raison, nous ne prendrons pas en compte cette mesure dans nos futures analyses.

Le nombre total de mouvements nécessaires à la résolution de la tâche a été mesuré dans chacune des quatre conditions. De plus, nous avons analysé à titre exploratoire les mouvements légaux et les mouvements illégaux. Le but était de voir si les enfants réalisent autant des mouvements légaux que des mouvements illégaux, et si le nombre de chacun de ces mouvements varie entre la tâche principale et la tâche de transfert. De plus, pour les raisons évoquées dans les deux premières études, nous n'avons pas intégré le temps total de résolution dans nos analyses. En revanche, comme nous l'avons dit quelques lignes plus haut, parce que le dispositif numérique utilisé dans cette étude permet de recueillir les temps d'exécution des mouvements légaux et des mouvements illégaux, nous allons à titre exploratoire analyser aussi

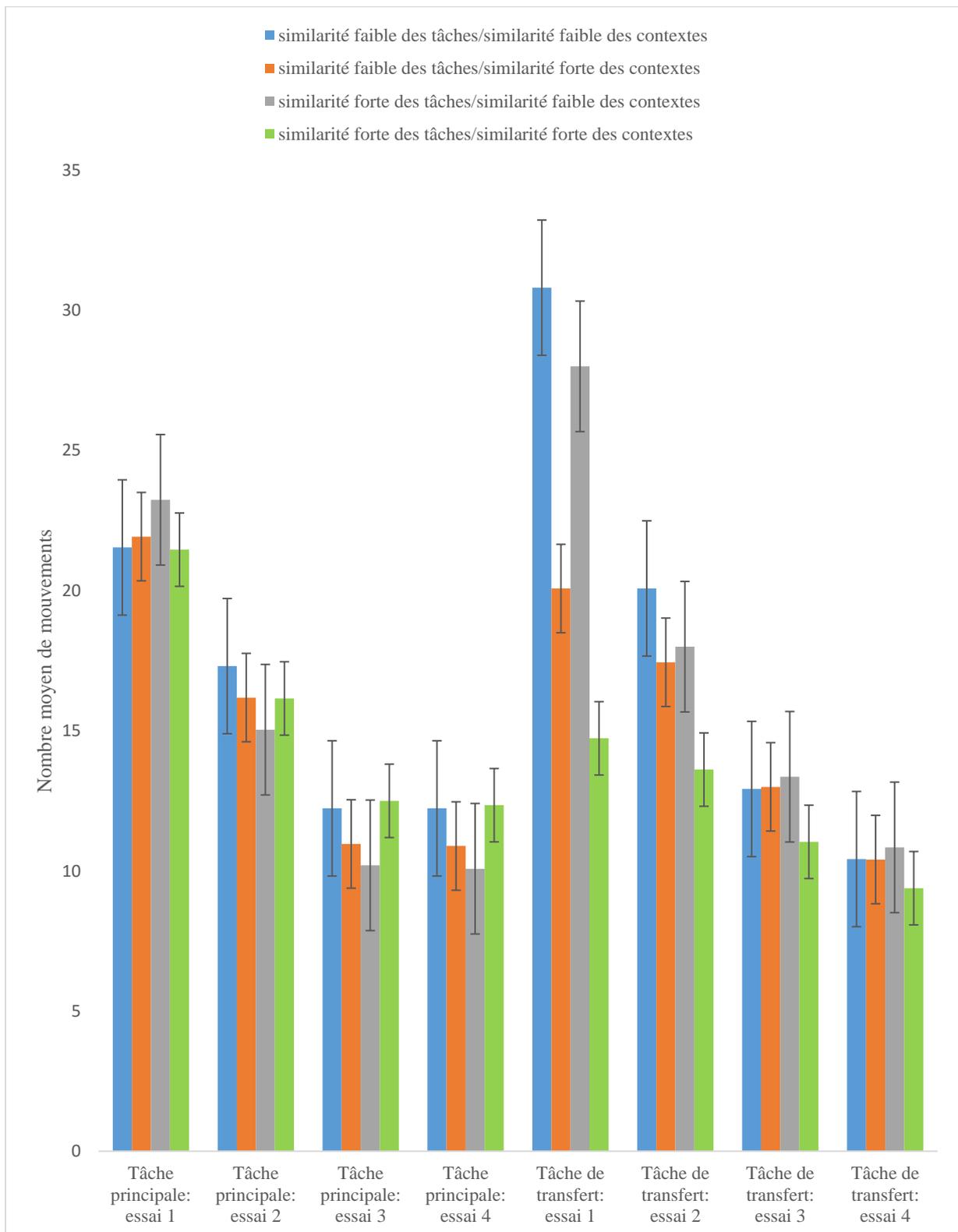
ces mesures. Le but est d'une part, d'examiner la vitesse avec laquelle les enfants exécutent les mouvements légaux et les mouvements illégaux. D'autre part, nous verrons si la vitesse d'exécution de ces deux types de mouvements change de la tâche principale à la tâche de transfert. Ces différentes mesures ont pour but de montrer la pertinence de ne pas faire d'analyse globale des temps de résolution, car tous les mouvements ne sont pas exécutés avec la même vitesse, mais de lui préférer une analyse détaillée des nombres de mouvements. Nous présentons ci-dessous les performances aux tâches principale (4 essais) et de transfert (4 essais). Les résultats ont été traités par l'analyse de variance, et des comparaisons planifiées ont été effectuées pour localiser les sources des différences significatives.

### 6.3.1. Analyse des mouvements

Une Anova à mesures mixtes 8 (essais, intrasujet) \* 4 (degrés de similarité, intersujet) a été réalisée sur le nombre total de mouvements effectués.

L'effet du facteur essai est significatif,  $F(7, 700) = 77.23, p < .001$   $\eta^2p = .44$ . Pour savoir si la performance augmente significativement au cours de la tâche principale, nous avons comparé les essais 1 et 4 de la tâche principale. Les enfants effectuent significativement davantage de mouvements à l'essai 1 ( $M = 22.03, SD = 9.83$ ) qu'à l'essai 4 ( $M = 11.39, SD = 3.97$ ) ( $p < .001$ ) Pour tester l'hypothèse d'une baisse de performances au transfert, nous avons comparé le dernier essai de la tâche principale et le premier essai de la tâche de transfert. Les performances chutent au premier essai de transfert ( $M = 23.33, SD = 10.40$ ) par rapport au quatrième essai de la tâche principale (cf. Figure 29) ( $p < .001$ ). Le premier essai de transfert et le deuxième essai de transfert ont été comparés pour vérifier l'hypothèse d'un regain de performances. Les enfants font significativement moins de mouvements pour effectuer le deuxième essai de transfert ( $M = 17.28, SD = 7.70$ ) que pour effectuer le premier essai de transfert ( $p < .001$ ). De plus, les performances des enfants s'améliorent au fil des essais, puisqu'ils produisent significativement plus de mouvements pour résoudre la tâche au

deuxième essai de transfert qu'au troisième ( $M = 12.58, SD = 3.58$ ) ( $p < .001$ ), dans lequel ils font plus de mouvements qu'au quatrième ( $M = 10.26, SD = 2.87$ ) ( $p < .001$ ).



**Figure 29.** Nombre de mouvements dans chaque condition selon les essais. Les barres d'erreur représentent les erreurs-types.

L'effet principal du facteur degré de similarité est significatif,  $F(3, 100) = 4.04$ ,  $p = .009$ ,  $\eta^2p = .11$ . Le nombre de mouvements en condition de similarité faible des tâches et similarité faible des contextes ( $M = 17.49$ ,  $SD = 7.67$ ) est significativement supérieur à celui en condition de similarité forte des tâches et similarité forte des contextes, ( $M = 13.90$ ,  $SD = 4.68$ )  $p = .007$ . Les autres différences ne sont pas significatives.

L'effet d'interaction essai \* degré de similarité est significatif,  $F(21, 700) = 5.56$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2p = .14$ . Pour s'assurer que les groupes avaient le même niveau de performances avant la phase de transfert, nous avons fait des comparaisons planifiées entre les conditions à chaque essai de la tâche principale. Il n'y a pas de différences significatives entre les groupes à tous les essais de la tâche principale, montrant par-là que les quatre conditions de réalisation de la Tour de Hanoi étaient de difficulté équivalente en tâche principale. Afin de tester l'hypothèse d'une supériorité de la condition similarité forte des tâches et similarité forte des contextes sur les autres conditions, nous avons comparé, à chaque essai de transfert, les résultats obtenus dans chacune des 4 conditions.

Au premier essai, les enfants en condition de similarité forte des tâches/similarité forte des contextes ( $M = 14.73$ ,  $SD = 4.21$ ) font moins de mouvements que les enfants dans la condition de similarité forte des tâches/similarité faible des contextes ( $M = 28$ ,  $SD = 6.33$ ), dans la condition de similarité faible des tâches/similarité forte des contextes ( $M = 20.07$ ,  $SD = 9.27$ ), et dans la condition de similarité faible des tâches/similarité faible des contextes ( $M = 30.81$ ,  $SD = 11.49$ ),  $p < .001$  dans tous les cas. Le nombre de mouvements dans la condition similarité faible des tâches/similarité forte des contextes est inférieur aux deux autres conditions ( $p < .001$ ). Les autres différences ne sont pas significatives.

Au deuxième essai, les enfants en condition de similarité forte des tâches/similarité forte des contextes font moins de mouvements ( $M = 13.62$ ,  $SD = 4.64$ ) que ceux dans les conditions de similarité forte des tâches/similarité faible des contextes ( $M = 18.62$ ,  $SD = 7.52$ ) ( $p = .03$ ) et

similarité faible des tâches/similarité faible des contextes ( $M = 20.08$ ,  $SD = 8.99$ ) ( $p = .002$ ). Les autres différences ne sont pas significatives. Il n'y a pas de différences entre les conditions au troisième essai de transfert et au quatrième essai de transfert.

Comme rappelé plus haut, à titre exploratoire nous comparons le nombre de mouvements légaux au nombre de mouvement illégaux, au premier essai de la tâche principale et au premier essai de la tâche de transfert, ces deux essais marquant le début de réalisation de chaque version de la Tour de Hanoï. Ces analyses ont été conduites à l'aide du  $t$  de student. Au premier essai de la tâche principale, le nombre des mouvements légaux ( $M = 16.55$ ,  $SD = 7.64$ ) est significativement supérieur au nombre des mouvements illégaux ( $M = 5.47$ ,  $SD = 5.36$ ),  $t(103) = 12.98$ ,  $p < .001$ ,  $d = 1.81$ . Au premier essai de la tâche de transfert, le nombre des mouvements légaux ( $M = 17.21$ ,  $SD = 6.18$ ) est significativement supérieur au nombre des mouvements illégaux ( $M = 6.12$ ,  $SD = 5.56$ ),  $t(103) = 20.79$ ,  $p < .001$ ,  $d = 1.89$ . Ces résultats montrent que lors de la résolution de la Tour de Hanoï, les deux types de mouvements (légaux vs illégaux) ne sont pas de valeur équivalente. L'exécution d'un mouvement illégal peut conduire à la découverte d'un mouvement légal (Richard et al., 1993; Zanga et al., 2004).

### **6.3.2. Analyse des temps de résolution**

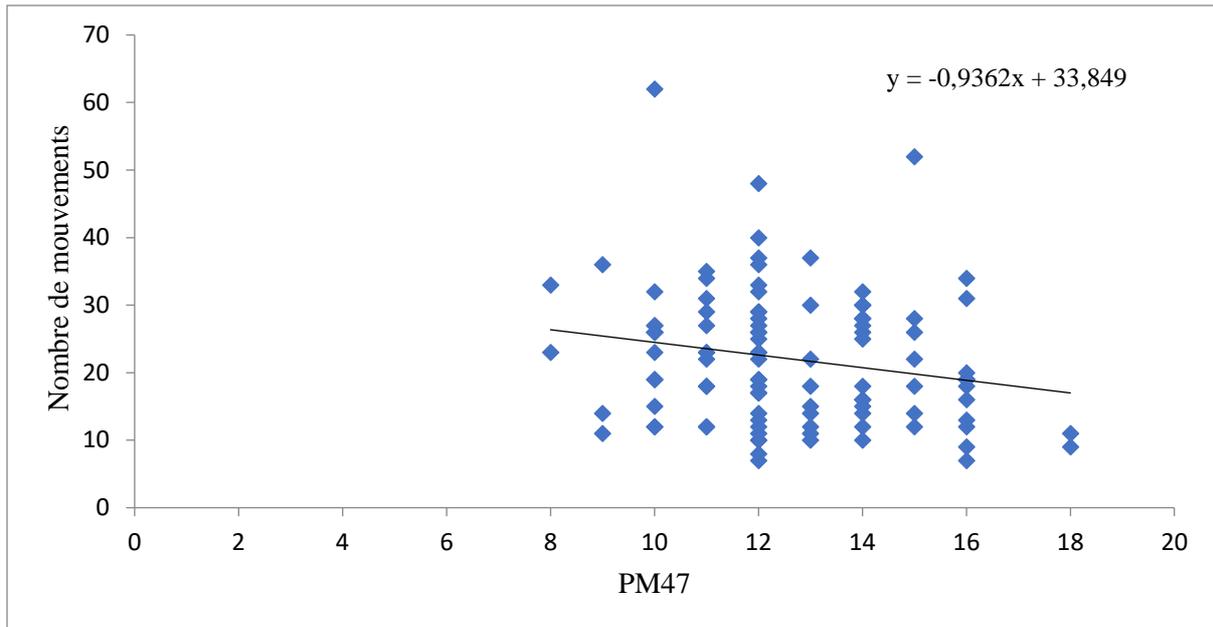
A l'aide du  $t$  de student, nous avons comparé le temps moyen (en millisecondes) des mouvements légaux vs des mouvements illégaux, au premier essai de la tâche principale et au premier essai de la tâche de transfert. Au premier essai de la tâche principale, les enfants mettent plus de temps à exécuter les mouvement illégaux ( $M = 6177.88$ ,  $SD = 9144.56$ ) qu'à exécuter les mouvements légaux ( $M = 4269.56$ ,  $SD = 4531.64$ ),  $t(103) = -3.22$ ,  $p = .02$ ,  $d = .27$ . De même, au premier essai de la tâche de transfert, les enfants mettent plus de temps à exécuter les mouvements illégaux ( $M = 11699.28$ ,  $SD = 12634.63$ ) qu'à exécuter les mouvements légaux ( $M = 6014.68$ ,  $SD = 3315.28$ ),  $t(103) = -4.81$ ,  $p < .001$ ,  $d = .71$ . Ces résultats attestent que tous les mouvements pour réaliser la Tour de Hanoï ne sont pas exécutés avec la même vitesse, et il

serait par conséquent inopportun, par ce qu'inexact, de diviser le temps total par le nombre de mouvements pour obtenir le temps par mouvement (Huber et al., 2016; Schiff & Vakil, 2015).

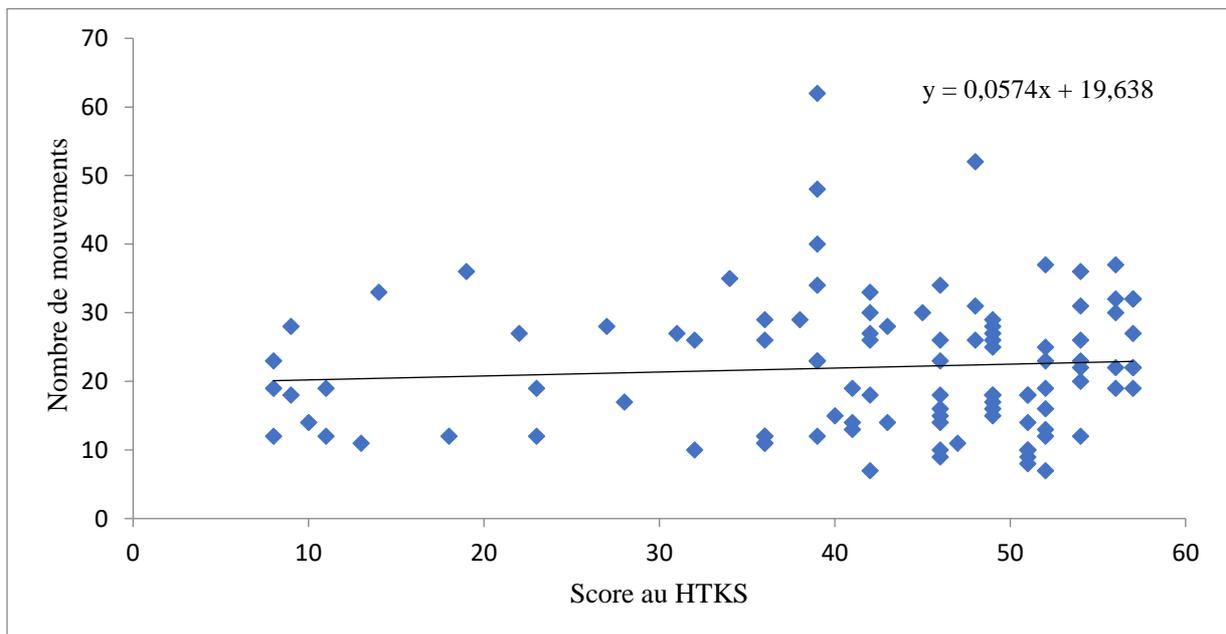
### **6.3.3. Analyse des scores d'intelligence et des scores d'inhibition**

Les scores au PM47 prédisent le nombre de mouvements effectués au premier essai de la tâche principale  $F(3, 100) = 4.43$ ,  $\beta = -.20$ ,  $p = .04$ ,  $R^2 = .42$ , mais ne prédisent pas le nombre de mouvements au premier essai de transfert  $F(3, 100) = 2.01$ ,  $\beta = -.14$ ,  $p = .16$ ,  $R^2 = .02$ . Au premier essai de la tâche principale il n'y a pas de liens entre les scores aux tests d'inhibition et le nombre de mouvements produits, HTKS,  $F(3, 100) = .63$ ,  $\beta = -.08$ ,  $p = .43$ ,  $R^2 = .01$ , et Day and Night,  $F(3, 100) = 3.16$ ,  $\beta = -.17$ ,  $p = .08$ ,  $R^2 = .03$ . En revanche, les scores aux deux tests d'inhibition sont prédictifs du nombre de mouvements effectués au premier essai de transfert : HTKS,  $F(3, 100) = 9.51$ ,  $\beta = -.29$ ,  $p = .03$ ,  $R^2 = .09$ , Day and Night  $F(3, 100) = 7.26$ ,  $\beta = -.26$ ,  $p = .008$ ,  $R^2 = .07$ . Les droites de régression sont présentées dans les figures 30, 31, 32, 33, 34. Les valeurs des coefficients de régression bêtas sont négatives, ce qui montre que meilleures sont les capacités d'inhibition, moins le nombre de mouvements nécessaires pour réaliser la tâche de transfert est élevé.

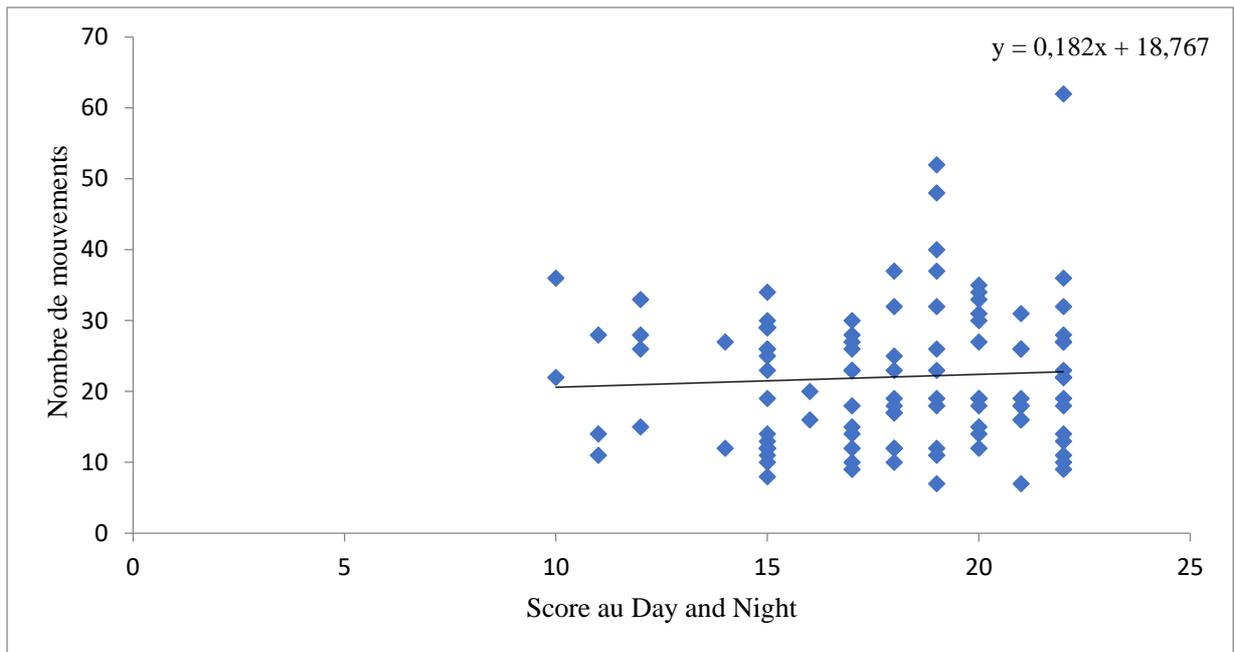
Enfin, les scores au HTKS sont positivement corrélés aux scores au Day and Night, ( $r = .34$ ,  $p < .001$ ), attestant dans une certaine mesure d'une parenté des processus de contrôle inhibiteur responsables des performances à ces deux tâches.



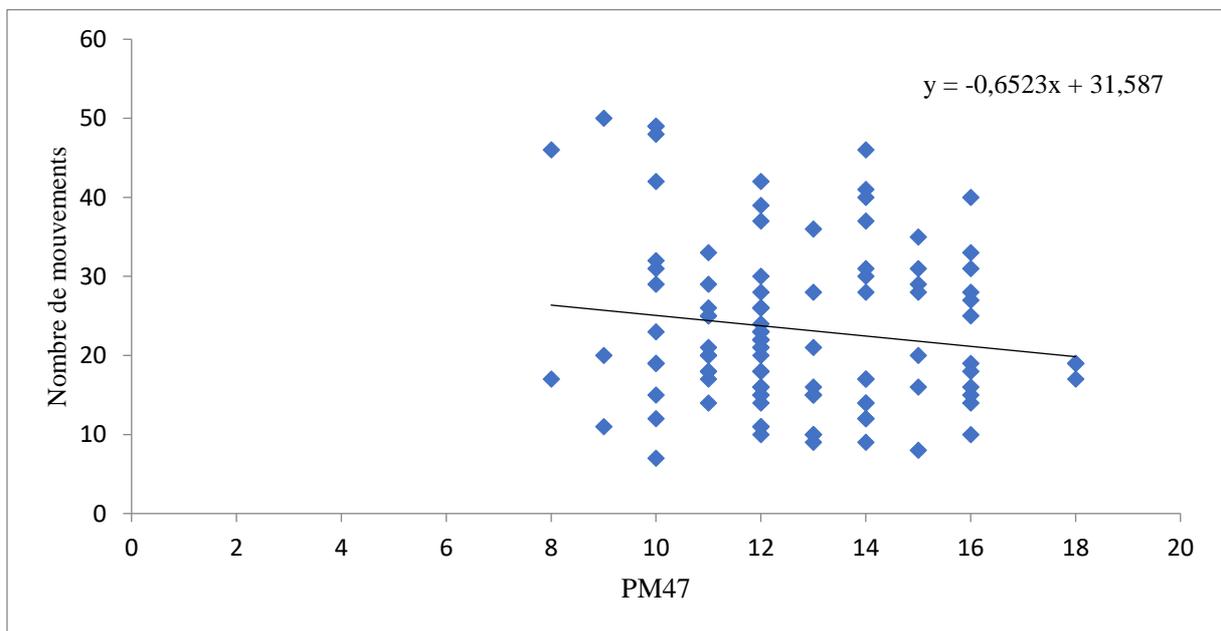
**Figure 30.** Liens prédictifs entre les scores d'intelligence (PM47) et le nombre de mouvements à l'essai 1 de la tâche principale.



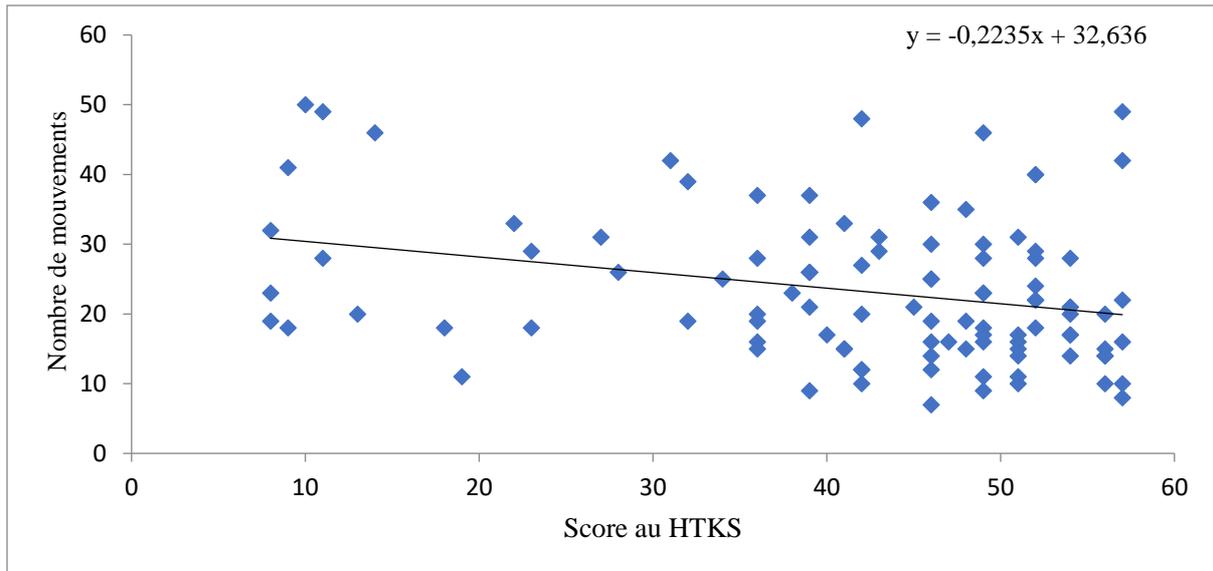
**Figure 31.** Liens prédictifs entre les scores d'inhibition de réponse comportementale (HTKS) et le nombre de mouvements à l'essai 1 de la tâche principale.



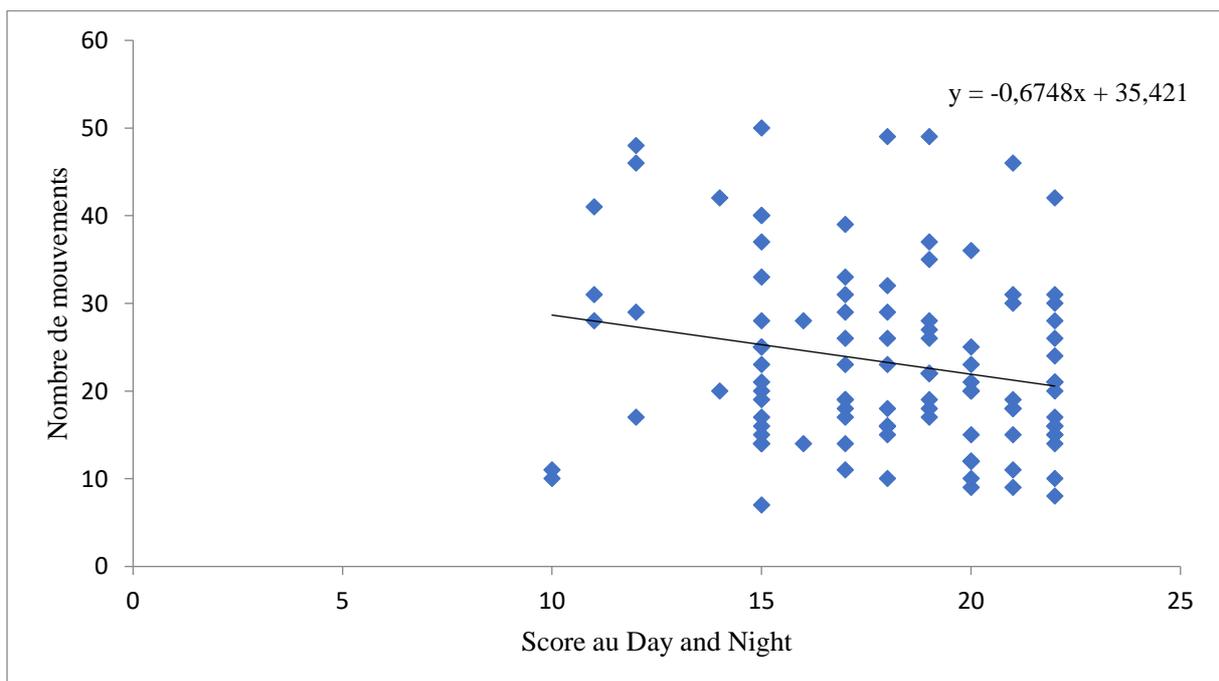
**Figure 32.** Liens prédictifs entre les scores d'inhibition cognitive (Day and Night) et le nombre de mouvements à l'essai 1 de la tâche principale.



**Figure 33:** Liens prédictifs entre les scores d'intelligence (PM47) et le nombre de mouvements à l'essai 1 de transfert.



**Figure 33.** Liens prédictifs entre les scores d’inhibition de réponse comportementale (HTKS) et le nombre de mouvements à l’essai 1 de transfert.



**Figure 34.** Liens prédictifs entre les scores d’inhibition cognitive (Day and Night) et le nombre de mouvements à l’essai 1 de transfert.

## 6.4. Discussion

L'objectif de cette étude était de tester l'hypothèse de la similarité conjointe des tâches et des contextes sur la qualité du transfert numérique chez l'enfant, dans plusieurs versions numériques isomorphes de la Tour de Hanoï. La première hypothèse envisageait une baisse de performances lors du passage de la tâche principale à la tâche de transfert (H1). Notre deuxième hypothèse prévoyait que cette baisse de performances soit amoindrie, voire absente, entre les versions présentant des similarités de surface ainsi que de contexte (*near transfer*) (H2). Dans la troisième hypothèse, nous nous attendions à ce que la baisse de performances soit moins marquée entre les versions présentant, soit des similarités de surface mais des dis-similarités de contexte, soit des dis-similarités de surface mais des similarités de contexte, par rapport à une situation de transfert caractérisée par des dis-similarités conjointes de surface et de contexte (H3). Nous prédisions dans la quatrième hypothèse que les performances des enfants ré-augmenteraient dans les essais 2, 3 et 4 de la tâche de transfert, après la baisse de performances observée au premier essai de transfert (H4). Pour terminer, conformément aux résultats des deux premières études de ce travail, nous faisons l'hypothèse d'une implication de l'inhibition dans les performances en tâche de transfert (H5).

Concernant la première hypothèse, les résultats ont montré que les performances de tous les enfants chutaient du dernier essai de la tâche principale au premier essai de la tâche de transfert. En effet, au premier essai de transfert, les enfants résolvaient la tâche en un nombre de mouvements plus important qu'au dernier essai de la tâche principale. Une explication possible est le changement des contextes numériques de présentation des tâches. Un nouveau contexte numérique, même s'il est en partie similaire à l'ancien, implique nécessairement un traitement des nouveaux éléments de décor, ce qui peut entraver le traitement en profondeur de la tâche elle-même. Mayer (2008) suggère de ne pas insérer de détails attrayants dans une interface graphique de présentation d'une tâche, lorsque ceux-ci sont inutiles à la

compréhension de la tâche. L'insertion d'un matériel inutile à la compréhension conduit en effet l'apprenant à s'engager dans un traitement non pertinent pour la compréhension de la structure de la tâche (Hirsh-Pasek et al., 2015), ce qui occasionne une charge cognitive extrinsèque (Sweller, 2005). Les détails présents dans les différents contextes numériques de présentation ont ainsi pu mobiliser inutilement une partie des ressources cognitives des participants.

Une charge cognitive extrinsèque mobilise une partie des ressources cognitives qui devraient être consacrées à la charge cognitive essentielle et à la charge cognitive intrinsèque (Amadiou & Tricot, 2006), ces deux dernières représentant le coût cognitif minimal engendré lors d'un traitement de la tâche en profondeur qui permet une bonne compréhension de celle-ci. Dans la présente étude, la nouveauté du contexte numérique de présentation de la tâche de transfert a nécessité un traitement des nouveaux éléments de décor, occasionnant une charge cognitive extrinsèque néfaste à la compréhension de la structure de la tâche. Il est possible que par manque de ressources cognitives suffisantes, les enfants aient été gênés dans la réalisation de la tâche et aient donc produit davantage de mouvements, car une partie de leurs ressources était dédiée à traiter des éléments de décor plutôt qu'à planifier les mouvements de manière efficace. Des études ont par exemple montré que les apprenants qui réalisent une tâche sur une interface graphique sans détails attrayants performant mieux que ceux qui réalisent la tâche sur une interface contenant des détails attrayants, ce qui illustre le principe de cohérence (Mayer, Heiser, & Lonn, 2001; Park et al., 2015; Wang & Adesope, 2014; Sundararajan & Adesope, 2020). De plus, la baisse de performances observée dans cette étude est cohérente avec les résultats obtenus dans des études antérieures, ayant montré chez l'enfant une chute de performances entre deux tâches pourtant fortement similaires (Clerc et al., 2021; Gellert et al., 2021; Resing et al., 2016).

Concernant la deuxième hypothèse, les résultats montrent qu'au premier essai de transfert, les enfants en condition de similarité forte des tâches et similarité forte des contextes produisent significativement moins de mouvements pour effectuer la Tour de Hanoï que les enfants dans les trois autres conditions, ce qui valide l'hypothèse. Si tous les enfants voient leurs performances chuter au premier essai de la tâche de transfert, cette chute est néanmoins amoindrie chez les enfants qui résolvent la tâche présentée dans un contexte numérique présentant un fort degré de similarité avec celui de la tâche principale. Parce que les éléments de décor qui environnent la tâche dans les deux contextes numériques sont sémantiquement similaires (arbustes et cocotiers), de même que la forme des empilables qui définissent une forte similarité de la surface des deux tâches (trapèze et rectangles), les enfants dans cette condition ont probablement fourni moins d'effort cognitif que les autres enfants pour traiter la tâche de transfert. En effet, dans la condition de similarité forte des tâches et similarité forte des contextes, le traitement des éléments de surface de la tâche de transfert (empilables de forme trapézoïdale) a sans doute consommé moins de ressources cognitives, du fait de leur forte similarité perceptive avec les éléments de surface de la tâche principale (empilables de forme rectangulaire). Pour cette raison, cette situation de transfert semble avoir été plus favorable que les trois autres, car elle est globalement moins consommatrice de ressources cognitives

Concernant la troisième hypothèse, les enfants dans la condition de similarité faible des tâches et similarité forte des contextes résolvent la tâche en un nombre de mouvements significativement inférieur à celui obtenu dans les deux autres conditions. Cette hypothèse n'est donc validée que partiellement. Ceci montre que la chute de performances est amoindrie chez les enfants qui résolvent la tâche présentée dans un contexte numérique présentant un fort degré de similarité avec celui de la tâche principale. Parce que les éléments de décor qui environnent la tâche au sein des deux contextes sont sémantiquement similaires (arbustes et cocotiers), les enfants dans cette condition ont probablement fourni moins d'effort cognitif que dans les deux

autres conditions pour traiter la tâche de transfert. Il est en effet possible que le contexte numérique de présentation de la tâche de transfert ait agi comme un indice de rappel, permettant aux enfants de récupérer en mémoire à long terme les éléments du contexte numérique d'apprentissage et la tâche associée. Aladé et al. (2016) ont par exemple montré que lorsque les tâches présentées sur une interface numérique graphique appartenaient au même domaine de connaissance, les enfants transféraient efficacement la mesure apprise, ce qui n'était pas le cas lorsque les domaines de connaissance des deux tâches étaient différents. Par comparaison à la condition similarité forte des tâches et similarité faible des contextes, les enfants dans la condition de similarité faible des tâches et similarité forte des contextes ont eu à traiter la forme des empilables, peu similaire à celle des empilables de la tâche principale. Ce degré moyen de similarité globale a occasionné un transfert moins efficace que dans la condition de similarité forte des tâches et similarité forte des contextes.

En ce qui concerne les deux autres conditions, une explication possible aux performances de transfert moins bonnes est la dis-similarité des contextes numériques de présentation. Certaines études ont montré que les détails attrayants interfèrent avec l'apprentissage de la tâche (Wang & Adesope, 2014), et lorsqu'ils sont présentés avec une tâche à forte demande cognitive, ces détails détériorent davantage le traitement de la tâche (Park et al., 2011). Dans ce sens, il semble que le traitement des éléments de décor (contexte numérique de présentation) soit cognitivement plus coûteux que celui des éléments perceptifs des tâches, car celles-ci ne diffèrent que sur la forme des empilables (différences perceptives) mais pas sur le contenu (différences sémantiques). Il est possible que la tâche principale ait été encodée de manière « enchâssée » dans les éléments de décor, et qu'un changement de contexte numérique (donc de décor) n'ait pas permis d'établir facilement la similarité entre les tâches, entravant ainsi le transfert.

Concernant la quatrième hypothèse, le regain de performances au transfert est attesté par un nombre de mouvements significativement inférieur au deuxième essai de la tâche de transfert par rapport au premier essai de cette même tâche. Ce pattern, déjà observé dans les deux premières études, est donc répliqué ici. Comme dans les deux autres études, une explication possible est une adaptation au fur et à mesure que les enfants réalisent la tâche. Les incertitudes nées de la nouveauté des éléments de décor et du changement de la forme des empilables se sont probablement dissipées au fil des essais, faisant ainsi remonter les performances des enfants.

Par ailleurs, les résultats ont montré qu'indépendamment de la phase (apprentissage vs transfert), pour réaliser la Tour de Hanoi, les enfants exécutent plus de mouvements légaux que de mouvements illégaux. Néanmoins, ils mettent plus de temps pour effectuer les mouvements illégaux que pour les mouvements légaux. Ce résultat vient nuancer l'approche des études antérieures consistant à mesurer la vitesse d'exécution d'un mouvement en divisant le temps total par le nombre total de mouvements (Huber et al., 2016; Schiff & Vakil, 2015; Tarasuik et al., 2017). En effet, les résultats de la présente étude suggèrent que tous les mouvements ne sont pas réalisés avec la même vitesse. La violation d'une règle (mouvement illégal) peut permettre de découvrir un mouvement légal. Certains chercheurs soutiennent en effet que c'est en supprimant les contraintes soit internes, soit externes (violation des règles) que le résolveur découvre les opérateurs légaux (Richard et al., 1993; Zanga et al., 2004). Ainsi, tous les mouvements réalisés ne sont pas de valeur équivalente, et il est fort probable qu'ils ne sont pas réalisés avec la même précision et encore moins avec la même vitesse. Dans une situation d'impasse par exemple, il est probable que les enfants hésitent à effectuer un mouvement, qui dans ce cas est souvent erroné, ce qui se traduit par un temps plus important qu'un mouvement réussi (Clément, 2003). Ainsi, tous les mouvements ne sont pas réalisés avec la même vitesse,

et penser que les temps mis pour effectuer tous les mouvements sont équivalents serait une erreur.

Notre dernière hypothèse portait sur le potentiel rôle du contrôle inhibiteur dans le transfert numérique entre différentes versions de la Tour de Hanoï. Les résultats ont montré que les scores aux tests d'inhibition sont prédictifs du nombre de mouvements au premier essai de transfert. Une explication possible est que lors de la réalisation de la tâche de transfert, les enfants doivent inhiber les interférences nées de la double dis-similarité entre les tâches et entre les contextes numériques de présentation. En effet, dans la présente étude, le traitement des éléments de décor environnant les tâches de transfert (contextes numériques au transfert) a probablement moins perturbé le transfert lorsque ces éléments étaient similaires à ceux de la tâche principale (arbustes et cocotiers) que lorsqu'ils ne l'étaient pas (arbustes et maisons). Si l'on se réfère au modèle de Diamond (2013), le contrôle inhibiteur comprend, outre les deux dimensions que nous avons mesurées dans cette étude (inhibition de réponse comportementale et inhibition cognitive), une troisième dimension qui est l'inhibition au niveau attentionnel. Celle-ci permet le contrôle de l'interférence, non pas spécifiquement entre éléments présents en mémoire de travail (comme c'est le cas dans l'inhibition cognitive) mais entre éléments de nature indéterminée auxquels doit s'appliquer l'attention sélective ou focalisée. Nous n'avons pas mesuré cette inhibition attentionnelle dans cette thèse, mais une telle mesure pourrait être intéressante, en particulier du fait des différences d'éléments de décor entre les tâches principale et de transfert. En effet, si deux contextes numériques de présentation différents se caractérisent par des éléments de décor différents, les éléments de décor environnant la tâche de transfert constituent des stimuli interférents que l'enfant doit inhiber. Il semble que l'inhibition requise pourrait correspondre à ce que Diamond (2013) qualifie d'inhibition attentionnelle, habituellement mesurée par des tâches de type Flanker. De futures études pourront permettre

d'ajouter une telle mesure de l'inhibition attentionnelle afin d'évaluer la potentielle contribution de celle-ci au transfert numérique de la Tour de Hanoï chez l'enfant.

Un contexte numérique de transfert différent du contexte numérique d'apprentissage implique un traitement supplémentaire qui consomme des ressources et peut de ce fait entraver le transfert. En effet, pour traiter la tâche de transfert et pouvoir se référer à la tâche principale pour transférer la procédure d'exécution, il est nécessaire d'ignorer délibérément les éléments de décor présents sur l'interface de présentation de la tâche de transfert. Clément (1997) et Richard, Clément, et Tijus (2002) soutiennent que la première phase de résolution d'un problème tel que la Tour de Hanoï est une phase exploratoire, durant laquelle les résolveurs apprennent les règles et découvrent des opérateurs légaux. La présente étude suggère que dans le paradigme de transfert numérique entre deux versions de la Tour de Hanoï, les enfants apprennent en effet probablement les règles et découvrent les opérateurs lors du premier essai de la tâche principale. Néanmoins, lors du premier essai de la tâche de transfert, plutôt que de réapprendre les règles et les opérateurs légaux, il est probable que les enfants apprennent à inhiber les interférences causées par les dis-similarités des tâches et des contextes numériques. Ceci est cohérent avec les résultats de cette étude qui montrent que l'intelligence générale prédit les performances des enfants au premier essai de la tâche principale mais ne les prédit plus en tâche de transfert, alors que l'inhibition prédit les performances au premier essai de transfert.

Dans cette dernière étude, comme dans les deux précédentes, les tâches ont été réalisées sur une tablette numérique qui présente des aspects attrayants pour l'enfant. En effet, la facilité d'usage des tablettes numériques (Major et al., 2017) et leur attractivité pour les enfants (Robinson & Brower, 2016), ont probablement conduit les enfants à s'engager dans la tâche principale sans exercer de contrôle sur leurs processus cognitifs. Ceci explique probablement pourquoi le temps que les enfants prennent pour s'engager dans la tâche ne varie pas d'un groupe à un autre ou d'un essai à un autre. Schiff et Vakil (2015) ont mesuré le processus de

planification à l'aide du temps mis entre la présentation de la tâche et le premier mouvement. Ils ont observé une meilleure planification au fil des essais d'apprentissage, mais qui se détériore lors du passage à la tâche de transfert. Dans la présente étude, nous n'avons pas observé d'effet de planification, probablement à cause du support utilisé. Dans l'étude de Schiff et Vakil (2015), les enfants réalisaient la tâche sur un ordinateur et utilisaient un clavier. En revanche dans la présente étude, la tâche a été présentée sur une tablette numérique qui est très attrayante pour l'enfant, ce qui le conduit à interagir systématiquement avec l'écran. Ainsi, en résolution de problème, l'analyse et l'interprétation de l'apprentissage sur tablette numérique et le transfert qui en découle doivent tenir compte des caractéristiques des interfaces graphiques.

## **6.5. Conclusion**

Les résultats obtenus dans cette étude confirment les résultats déjà observés dans les deux premières études. En effet, il a été observé une baisse de performances au transfert dans le transfert numérique entre des versions isomorphes de la Tour de Hanoï chez l'enfant. De plus, les performances des enfants remontent dès le deuxième essai de transfert. Du fait qu'on observe dans la condition de forte similarité des tâches et forte similarité des contextes une baisse de performances au transfert moins prononcée que dans les autres tâches, cette étude soutient aussi le modèle de Klahr et Chen (2011).

Dans un paradigme de transfert numérique, le traitement des éléments de décor environnant la tâche de transfert sur l'interface graphique (contexte numérique de présentation de la tâche de transfert) est consommateur de ressources cognitives sous la forme d'une charge cognitive extrinsèque. Ceci est propre à entraver l'accès à la structure de la tâche, en réduisant le montant de ressources cognitives disponibles. Cela peut alors gêner l'enfant dans la mise en correspondance des deux tâches, rendant le transfert moins probable et/ou moins efficace.

De plus, l'intelligence était impliquée dans la phase d'apprentissage, alors que l'inhibition était impliquée dans la phase de transfert. Une explication possible est liée, là

encore, à la charge cognitive extrinsèque présente en tâche de transfert du fait des différences entre contextes numériques de présentation. Ces différences ont pu avoir pour effet d'augmenter le poids des processus inhibiteurs dans la résolution de la tâche de transfert, et dans le même temps de diminuer le poids de l'intelligence générale. Enfin, lorsqu'ils réalisent la Tour de Hanoï sur une tablette numérique, les enfants s'engageraient dans la tâche directement et sans un grand degré de contrôle, ne leur permettant pas ainsi de mieux planifier leurs actions au fur et à mesure qu'ils réalisent la tâche.

---

## CHAPITRE 7 : DISCUSSION GENERALE

---

L'objectif de ce travail de thèse était double. D'une part, parce qu'il a été montré dans la littérature que les enfants sont capables d'apprendre sur les tablettes numériques (voir Amadiou et al., 2019; Haßler et al., 2016, pour une revue), ce travail doctoral cherchait à voir si les enfants sont capables de transférer les apprentissages acquis sur les tablettes numériques à des tâches similaires, présentées sur des supports similaires ou différents. Dans cette perspective, la question était de savoir si ce type de transfert est également influencé par les facteurs identifiés dans le transfert classique : l'entraînement à la tâche principale et la similarité des tâches ainsi que des contextes, qui est par ailleurs la condition dans laquelle le transfert est le mieux réussi (*near transfer*).

Il s'agissait de tester l'effet bénéfique d'un entraînement spécifique à une procédure d'exécution de la tâche de Tour de Hanoï sur la baisse de performances au transfert, en limitant cette baisse. De même, nous avons testé l'effet de la similarité conjointe des tâches et des contextes de présentation conformément au modèle de Klahr et Chen (2011), en imbriquant ce modèle dans un type de transfert que nous avons qualifié de transfert numérique. D'autre part, du fait de l'implication de l'inhibition cognitive dans la résistance aux interférences et l'adaptation aux situations nouvelles, cette recherche entendait étudier le rôle que l'inhibition peut jouer dans la baisse de performances au transfert numérique en résolution de problème. Pour cela, trois études ont été menées auprès d'enfants âgés de 6 à 7 ans. Nous présentons à présent les principaux résultats obtenus et leurs implications théoriques et pratiques.

### **7.1. Entraînement à la tâche principale**

L'hypothèse d'un effet de l'entraînement sur la baisse de performances dans le transfert numérique entre différentes versions de la Tour de Hanoï a été testé dans la première étude. En effet, toute résolution de problème implique une connaissance des exigences du problème et

une maîtrise des connaissances à employer (Akiguet, 2008). Pour cette raison, le but de cette étude était d'évaluer l'efficacité d'un entraînement spécifique à une procédure d'exécution, dans la limitation de la baisse de performances au transfert entre différentes versions numériques de la Tour de Hanoï. Les résultats obtenus ont d'abord montré que lors du passage de la tâche principale à la tâche de transfert, les performances des enfants chutent.

Lorsque les enfants passaient du dernier essai de la tâche principale au premier essai de la tâche de transfert, le nombre de mouvements effectués pour résoudre la tâche augmentait quel que soit le type d'entraînement reçu en tâche principale. Conformément au modèle de Klahr et Chen (2011), les dis-similarités de surface gênaient les enfants dans le traitement de la tâche de transfert, et ceci en dépit de l'entraînement y compris dans le cas d'un entraînement hautement spécifique. Ce résultat est cohérent avec ceux déjà observés dans la littérature, montrant que les enfants ne profitent pas toujours du bénéfice d'un entraînement dans des conditions de *near transfer* (Gellert et al., 2021; Resing et al., 2016). Il est possible que le maintien de la procédure en mémoire de travail, associé au traitement des éléments de surface de la tâche et des éléments de décor du contexte numérique, ait occasionné une charge cognitive élevée, consommant ainsi beaucoup de ressources cognitives.

Aladé et al. (2016) ont par exemple montré que lorsque la tâche principale et la tâche de transfert étaient présentées dans des domaines connaissances différents (animaux vs robot), les performances des enfants qui ont interagi avec l'écran d'une tablette numérique en tâche principale chutaient en tâche de transfert. Ces auteurs soutiennent que l'interactivité avec l'écran commande une activité physique importante qui n'est pas liée à la tâche elle-même, affectant par-là les capacités à traiter le concept général de la mesure, dans des tâches qui appartiennent à des domaines différents (e.g., mesurer un robot après avoir mesuré un animal). L'interactivité avec l'écran augmenterait la saillance perceptive de celui-ci, ce qui peut rendre difficile le transfert entre des tâches numériques présentées dans des contextes numériques

distincts. Il n'est d'ailleurs pas rare de voir dans la littérature sur le transfert numérique que la charge cognitive soit évoquée comme cause probable de la difficulté des enfants à réussir le transfert (Barr, 2013). Il s'agit précisément de la charge cognitive extrinsèque née du traitement des éléments non pertinents pour la compréhension et l'apprentissage de tâche, tels que les éléments de décors des interfaces graphiques. Cette charge cognitive ne permettrait pas aux enfants d'allouer suffisamment de ressources au traitement de la structure de la tâche de transfert pour en déceler l'isomorphisme avec la tâche principale, et transférer efficacement la procédure d'exécution.

Lors du passage à la tâche de transfert, les enfants ayant bénéficié d'un entraînement hautement spécifique perdaient probablement le bénéfice de cet entraînement à cause de la charge cognitive extrinsèque qui vient d'être évoquée. La baisse de performances était néanmoins moins marquée chez ces enfants par rapport aux enfants n'ayant pas bénéficié d'un tel entraînement. Ainsi, l'entraînement hautement spécifique à la procédure de résolution n'a pas permis de dissiper la baisse de performances au transfert, mais elle a permis de l'amoindrir. On peut supposer que les enfants ayant bénéficié de cet entraînement hautement spécifique ont maintenu en mémoire de travail la procédure d'exécution entraînée, mais ne l'ont pas appliquée avec autant d'efficacité que lors des derniers essais de la tâche principale. La présence des dissimilarités entre tâches et entre contextes numériques (interfaces graphiques) peut expliquer cette perte d'efficacité. Les enfants ayant bénéficié d'entraînements non spécifiques auraient quant à eux subi l'effet des dis-similarités, auxquels s'ajoute l'absence de l'effet bénéfique d'un entraînement spécifique à la procédure : ceci peut expliquer que la baisse de performances ait été encore plus marquée chez eux. De ce point de vue, il semble que tout comme le transfert classique, le transfert numérique soit régi par les similarités. Pour tester cette hypothèse nous avons fait varier les supports de présentation, étude dont les résultats sont discutés dans le point qui va suivre.

## **7.2. Similarité des tâches ainsi que des supports de présentation : numérique vs tangible**

Le but de la deuxième étude était de voir si conformément au modèle de Klahr et Chen (2011), le transfert entre deux versions isomorphes de la Tour de Hanoï est meilleur lorsqu'elles sont présentées sur des supports identiques que lorsqu'elles sont présentées sur des supports différents (numérique vs tangible) chez l'enfant d'âge scolaire. De plus, dans un paradigme bidirectionnel, cette étude visait à répliquer l'étude de Huber et al. (2016) ayant montré que le changement de support de présentation des tâches ne faisait pas chuter les performances lors du passage d'une version numérique de la Tour de Hanoï à une version tangible chez les enfants de 6 ans. Il s'agissait alors de voir si le transfert pouvait être observé entre deux versions isomorphes de la Tour de Hanoï présentées sur des supports différents : numérique/tangible ; tangible/numérique, conformément aux résultats obtenus par Huber et al., (2016) et Tarasuik et al. (2017), ou si le des différences de surface de type perceptif, même minimales, sont susceptibles d'entraver le transfert (Thibaut et al., 2010) et par-là de provoquer une baisse de performances.

Les résultats montrent que les performances de tous les enfants chutent lors du passage de la tâche principale à la tâche de transfert, attestant ainsi de la survenue d'une baisse de performances. Ce résultat étend ceux déjà observés dans la littérature ayant montré une baisse de performances avec un paradigme bidirectionnel (numérique vers tangible et tangible vers numérique) chez des enfants plus jeunes (Moser et al., 2015; Zack et al., 2013; Zack et al., 2009). À la différence des études antérieures, les résultats obtenus dans cette étude montrent que même dans des conditions où les supports de présentation sont identiques (2D-2D ; 3D-3D), relevant du *near transfer* (Barnett & Ceci, 2002), la baisse de performances au transfert est observée. Cette différence de résultats peut s'expliquer par le type de tâches utilisées dans cette étude. En effet, dans les études antérieures, seuls les supports de présentation des tâches

variaient, mais les tâches elles-mêmes étaient identiques, ce qui n'était pas le cas dans la présente étude. Dans cette étude, la version de la Tour de Hanoï à trois carrés était présentée en tâche principale et la version à trois disques était présentée en tâche de transfert, faisant ainsi varier les éléments de surface des deux tâches (carrés vs triangles). De plus, dans la tâche principale, les emplacements sont des planches sur lesquelles il faut poser les carrés, et dans la tâche de transfert, les emplacements sont des tiges sur lesquelles s'emboîtent les disques. Ainsi, dans les deux conditions intégrées, bien que les supports de présentation entre tâche principale et tâche de transfert soient identiques (2D-2D et 3D-3D), il est probable que les différences de surface entre les tâches aient créé des incertitudes chez les enfants, ne leur permettant pas de traiter la tâche de transfert aussi efficacement que la tâche principale, faisant par-là chuter leurs performances lors du premier essai de transfert.

Au premier essai de transfert, les enfants dans la condition intégrée numérique (2D-2D) font significativement moins de mouvements que les enfants dans les deux conditions croisées, ce qui n'est pas le cas pour les enfants dans la condition intégrée tangible (3D-3D). Ces résultats peuvent être interprétés dans le cadre de l'efficacité de la tablette numérique pour l'apprentissage. En effet, selon le modèle de Mayer (2005), les outils multimédia offrent à l'apprenant plusieurs sources pour une même information, permettant ainsi un traitement via plusieurs modalités sensorielles qui amoindrit la charge cognitive et facilite l'apprentissage. Dans cette perspective, les propriétés tactiles, de multifonctions, d'affordance, et d'interactivité de la tablette numérique semblent lui conférer une efficacité pédagogique (Haßer et al., 2016). Ces auteurs ont en effet recensé 16 études sur 23 qui ont montré un effet positif de la tablette sur l'apprentissage. Néanmoins, comme le remarquent Amadiou et al. (2019) il est difficile de conclure sur l'efficacité de la tablette numérique pour l'apprentissage, car les études qui ont montré cet effet positif de la tablette numérique dans la revue de Haßer et al. (2016) n'ont pas comparé les situations d'apprentissage avec tablette numérique à des situations sans tablette.

Les résultats de notre deuxième étude montrent qu'au deuxième essai de transfert, les enfants dans la condition croisée 2D-3D résolvent la tâche en un nombre de mouvements équivalent à celui des enfants dans les conditions intégrées, ce qui n'est pas le cas pour les enfants dans la condition croisée 3D-2D qui ont des performances inférieures à celles des autres enfants. Ces résultats suggèrent que les enfants ayant appris à résoudre la Tour de Hanoï sur tablette numérique ont mieux compris la structure de la tâche, facilitant le transfert dans la tâche présentée sur support tangible. La compréhension de la tâche principale est en effet critique, en cela qu'elle facilite le transfert (Chi & VanLehn, 2012). La différence de performances dans cette condition 2D-3D, avec les enfants des conditions intégrées, lors du premier essai de transfert, pourrait alors être attribuée au « double » traitement cognitif occasionné par la survenue conjointe du changement de la forme des empilables utilisés dans la tâche de transfert et du changement des supports de présentation des deux tâches.

Ce double traitement cognitif a sans doute consommé une partie des ressources cognitives qui auraient dû être dédiées au traitement en profondeur de la structure de la tâche de transfert pour déceler les similarités avec la tâche principale. Ceci pourrait expliquer la baisse de performances lors du passage à la tâche de transfert. Il a par exemple été montré que les enfants de 6 ans ne résistent pas activement aux distracteurs perceptifs (Thibaut et al., 2010), ce qui suggère qu'un simple changement de forme des empilables dans la Tour de Hanoï (carrés vs disques) peut perturber l'apprentissage de l'enfant. Les études de Huber et al. (2016) et de Tarasuik et al. (2017) ont montré que les enfants qui ont appris à résoudre la Tour de Hanoï en version numérique à trois disques avaient les mêmes performances que les enfants ayant appris à résoudre cette tâche en version tangible, lorsqu'ils réalisaient tous la version tangible à trois disques en tâche de transfert. Dans ces deux études, seul le support de présentation de la tâche changeait (numérique vs tangible), les tâches elles-mêmes étant identiques (Tour de Hanoï à 3 disques). La présente étude apporte une information supplémentaire sur le transfert entre

versions numérique et tangible de la Tour de Hanoï. Elle a montré que lors du passage d'une version numérique de la Tour de Hanoï à une version tangible, il y a une baisse de performances lorsque les éléments de surface des tâches ne sont pas similaires (carrés vs disques), ce qui nuance les résultats de Huber et al. (2016) et de Tarasuik et al. (2017) et est pertinent avec le modèle de Klahr et Chen (2011). Des études utilisant d'autres tâches et différences de surface entre ces tâches devraient être menées pour tester la robustesse de ce pattern. De plus, si l'efficacité de la tablette numérique par rapport au support tangible dans la résolution de la Tour de Hanoï chez des jeunes adultes a été montrée (Milla et al., 2019; Robinson & Brewer, 2016), la présente étude a montré que chez l'enfant cette efficacité n'est observable que lorsque le support de présentation de la tâche principale et celui de la tâche de transfert sont identiques, conformément là aussi au modèle de Klahr et Chen (2011).

Cette étude a permis de faire varier les éléments de surface des tâches (forme des empilables) ainsi que leur support de présentation (numérique vs tangible). Ces deux sources de variation ne permettent pas de tester de façon complète le modèle de Klahr et Chen (2011). Dans cette étude, nous n'avons pas testé les autres situations de transfert décrites dans le modèle de Klahr et Chen (2011) : similarité forte des tâches et similarité forte des contextes, similarité forte des tâches et similarité faible des contextes, et similarité faible des tâches et similarité faible des contextes. Une étape supplémentaire pour tester la pertinence du modèle de Klahr et Chen (2011) et de la taxonomie de Barnett et Ceci (2002) consiste à ces deux dernières situations de transfert afin d'étudier à la fois le degré de similarité des tâches et celui des contextes numériques de présentation. C'est ce qui a été fait dans la troisième étude de cette thèse, dont les principaux résultats sont discutés ci-dessous.

### **7.3. Similarité des tâches ainsi que des contextes numériques**

Dans notre troisième étude, nous avons testé l'hypothèse d'un effet bénéfique de la similarité conjointe des tâches et des contextes numériques sur le transfert. Le but était de tester

la validité du modèle de Klahr et Chen (2011), en incarnant le concept de contexte dans l'interface graphique de présentation des tâches. Nous avons testé la qualité du transfert entre différentes versions de la Tour de Hanoï plus ou moins similaires, présentées dans des contextes numériques plus ou moins similaires.

Les résultats ont montré que les performances des enfants chutaient lors du passage de la tâche principale à la tâche de transfert, y compris dans la condition comprenant une forte similarité entre les tâches ainsi qu'entre les contextes numériques. De tels résultats suggèrent qu'en dépit de la force des similarités, le transfert s'accompagne d'une baisse de performances entre des tâches de résolution de problèmes présentées sur une tablette numérique. La baisse de performances au transfert numérique est ainsi confirmée, après que nous l'ayons observée dans nos deux premières études. Ces résultats confortent le point de vue de Perruchet et Vinter (2002) qui soutiennent que si certains chercheurs mettent l'accent sur les résultats positifs dans le transfert d'apprentissage, l'échec du transfert a néanmoins été fréquemment rapporté dans la littérature sur l'apprentissage implicite. Ceci semble être également le cas en résolution de problèmes au vu de nos résultats et de ceux déjà observés dans certaines études (Resch et al., 2019; Schiff & Vakil, 2015).

La présente étude a montré que tous les mouvements effectués dans la résolution de la Tour de Hanoï ne sont pas exécutés avec la même vitesse. Un mouvement correct est en effet exécuté plus rapidement qu'un mouvement erroné. Ce pattern suggère que les enfants n'hésitent pas à choisir un opérateur légal, mais que lorsqu'ils sont dans une impasse, ils ne retrouvent plus en mémoire l'opérateur légal et finissent par choisir un opérateur illégal et donc enfreignent les règles. Dans une approche qualitative de la résolution de problèmes, Clément (2003) soutient que dans une situation d'impasse, le résolveur n'a en mémoire de travail qu'une liste de contraintes qui interdit toute action. Cette situation le conduit à effectuer des mouvements

erronés, en produisant des actions qui « défont » celles qu'il vient de faire, ce qui occasionne un temps d'exécution important.

Notons par ailleurs que la baisse de performances est moins marquée chez les enfants dans la condition de forte similarité des tâches et forte similarité des contextes numériques. L'explication que nous avons proposée est celle d'une charge cognitive extrinsèque qui serait moins importante que dans les autres conditions. En effet dans cette condition, parce que les éléments contenus dans l'interface de transfert (contexte numérique de la tâche de transfert) sont sémantiquement proches de ceux de l'interface d'apprentissage (contexte numérique de la tâche principale), les enfants ont pu déceler plus facilement la similarité entre les contextes numériques. Ceci leur aurait permis de n'allouer à cette étape de repérage des similarités qu'un montant de ressources cognitives modéré, préservant la majeure partie des ressources pour adapter la procédure à la tâche de transfert et ainsi réussir ce dernier. La récente méta-analyse de Sundararajan et Adesope (2020) montre qu'un effet important des détails attrayants a été observé sur l'apprentissage lorsque les apprenants n'ont aucune expérience préalable du domaine d'apprentissage. En revanche, lorsqu'ils ont une expérience préalable, un effet faible a été observé. Il est donc possible que la similarité sémantique des contextes numériques, associée à la similarité perceptive des tâches, ait permis un transfert plus efficace du principe de résolution appris dans la tâche principale. Ainsi, de même que la différence perceptive entre deux tâches gêne l'accès à leur structure commune, la différence sémantique entre deux contextes numériques de présentation des tâches occasionne une charge cognitive extrinsèque. Considérés ensemble, ces deux facteurs font décliner les performances des enfants lors du passage de la tâche principale à la tâche de transfert. C'est seulement lorsque les enfants s'aperçoivent de leurs erreurs par le biais de processus métacognitifs (Winne, 2011) qu'ils peuvent récupérer leurs performances par la suite. Un tel regain de performances fait l'objet du point suivant.

## 7.4. Pattern de regain de performances

Un pattern encore peu étudié dans la littérature sur les transferts d'apprentissage a systématiquement été observé dans cette thèse : le regain de performances. En effet, dans toutes les études de cette thèse, dès le deuxième essai de transfert, tous les enfants retrouvaient leur niveau de performances du dernier essai de la tâche principale. Ce pattern peut traduire le fait que les enfants se sont aperçus de leurs erreurs au premier essai de transfert et les ont corrigées dès l'essai suivant. Le premier essai de transfert semble alors être une phase exploratoire. Si dans la littérature la réussite du transfert est parfois observée, force est de constater que les études qui aboutissent à de tels résultats se réfèrent aux scores globaux des tâches, ce qui ne permet pas de voir la progression des scores de transfert au fil des essais (Perruchet & Vinter, 2002). Or, lorsqu'on décompose le score global de transfert en des scores par essai, on constate une variation des performances des enfants, se traduisant par une baisse de performances et un regain de celles-ci. Ce pattern de baisse puis regain est encore peu étudié dans la littérature, et de futures études pourraient lui être consacrées.

De plus, dans les deuxième et troisième études de cette thèse, le regain de performances se maintenait au troisième essai et s'amplifiait même au quatrième essai. Une explication possible est la dissipation des incertitudes. En effet, il est possible qu'à cause des dis-similarités entre tâches (empilables), supports de présentation (tangibles vs numériques), et entre contextes numériques de présentation (interfaces graphiques des tablettes numériques), au premier essai, les enfants aient traité la tâche de transfert comme une nouvelle tâche, c'est-à-dire sans se référer à la tâche principale. De même, les consignes de réalisation d'une tâche étant encodées avec le matériel de présentation de la tâche (Thibaut et al., 2018), il se pourrait que le changement de support et/ou d'interface graphique de présentation n'ait pas permis aux enfants de se rappeler des règles données en tâche principale, bien que celles-ci leur aient été rappelées juste avant de commencer la tâche, c'est-à-dire dès le début du premier essai de transfert. Par

ailleurs, comme pour tous les essais, dans ce premier essai de transfert, les enfants recevaient des feedbacks à chaque fois qu'ils enfreignaient une règle.

L'une des fonctions des feedbacks étant de rappeler à l'apprenant ses erreurs afin qu'il traite en profondeur l'information (Bosc-Miné, 2014), durant ce premier essai de transfert, qu'on pourrait qualifier d'exploratoire, grâce aux feedbacks les enfants ont pu identifier leurs mouvements erronés. Après avoir exploré la tâche dans cet essai ils ont ensuite pu corriger leurs mouvements erronés dès l'essai suivant, exploitant les feedbacks par le biais de processus métacognitifs favorables aux apprentissages (Clerc, 2013; Bjorklund & Causey, 2017; Winne, 2011). De plus, aux essais deux et trois de la tâche de transfert, il est possible qu'en répétant la même tâche les exigences de celle-ci s'amointrissent, ce qui a fait baisser la charge cognitive au fil des essais (Milla et al., 2019). Pour cette raison, au quatrième essai de transfert, les enfants ont pu allouer davantage de ressources cognitives au traitement de la structure de la tâche, ce qui a conduit à une meilleure planification des opérateurs et une exécution plus efficace de ceux-ci par rapport aux essais précédents.

Une autre façon de récupérer les performances après leur chute, et même de résister à cette dernière, consiste à contrôler les interférences nées des dis-similarités entre tâches et/ou contextes de présentation. Le contrôle des interférences étant assuré par l'inhibition cognitive (Diamond, 2013), il était intéressant de voir la potentielle implication de l'inhibition cognitive dans la résistance à la baisse de performances au transfert. C'est ce qui est discuté dans le point qui va suivre.

## **7.5. Lien entre inhibition cognitive et baisse de performances au transfert**

Dans les trois études de cette thèse, nous avons testé l'effet prédictif de l'inhibition cognitive sur la baisse de performances dans le transfert numérique, entre différentes versions de la Tour de Hanoï. Les résultats ont montré que les scores d'inhibition prédisaient le nombre

de mouvements au premier essai de transfert, mais pas au premier essai de la tâche principale. Ceci suggère que l'inhibition cognitive est impliquée dans la phase de transfert entre deux versions de la Tour de Hanoï, les enfants aux capacités d'inhibition plus élevées résistant mieux à la baisse de performances lors du passage à la tâche de transfert.

La Tour de Hanoï est considérée comme une tâche de résolution de problèmes sous-tendue par les trois Fonctions Exécutives (FE) fondamentales identifiées depuis Miyake (Miyake et al., 2000; He, Li & Yin, 2019). Elle permet de mesurer la planification, qui est elle-même sous-tendue par des manipulations de stratégies en mémoire de travail (Welsh & Huizinga, 2005) qui nécessitent un contrôle exécutif. C'est dans cette logique que nous avons étudié la potentielle implication de l'inhibition dans le transfert d'apprentissage entre différentes versions de la Tour de Hanoï (tangible vs numériques). De plus, s'il a été montré que les FE sont impliquées dans la réalisation de la Tour de Hanoï (Zhong-Hua, Bing-Hua, & Wen-Gang, 2019; Zook, Davalos, DeLosh, & Davis, 2004), les résultats des trois études de cette thèse ont montré que l'inhibition cognitive n'était pas impliquée dans la phase d'apprentissage, mais dans la phase de transfert.

Les scores d'inhibition ne prédisaient pas le nombre de mouvements au premier essai de la tâche principale, mais prédisaient en revanche le nombre de mouvements au premier essai de la tâche de transfert. Une explication possible réside dans le faible degré de contrôle exercé en tâche principale, par opposition à un degré de contrôle plus élevé exercé en tâche de transfert. Du fait de ses spécificités, la tablette tactile est réputée très attrayante pour les enfants, sa facilité d'utilisation permettant une expérience immersive (Robison & Brower, 2016). Ceci pourrait engager directement l'enfant dans la tâche et le pousser à produire systématiquement des mouvements avec les empilables sans toutefois exercer un fort degré de contrôle sur ses actions : c'est ce qui a pu se produire en tâche principale. Lorsqu'une version différente de la tâche est présentée, les dis-similarités de tâche et/ou de contexte peuvent avoir pour effet de lui

faire récupérer un haut degré de contrôle afin de neutraliser les interférences dues à ces dissimilarités. Les enfants doivent en effet contrôler les interférences nées des changements dans la tâche et/ou le contexte pour pouvoir identifier la structure commune aux deux tâches et réussir le transfert. Cette nécessaire adaptation est au cœur du transfert (Nokes, 2009; Schwartz et al., 2012) et elle est permise par les fonctions exécutives, dont l'inhibition cognitive.

Dans le paradigme des tâches isomorphes, la tâche de transfert est caractérisée par la nouveauté de ses éléments de surface. Dans le transfert numérique, ceci peut s'accompagner de la nouveauté de son support (numérique ou tangible selon les cas) et de son interface graphique de présentation en particulier les éléments de décor qui environnent la tâche. Cette double nouveauté est à l'origine d'interférences par rapport à la tâche principale, nées des éléments dissimilaires. Lorsque ces interférences ne sont pas contrôlées, elles gênent l'enfant dans le traitement de la structure de la tâche de transfert. Certains chercheurs soutiennent d'ailleurs que la difficulté à transférer des apprentissages serait en partie liée aux interférences nées de la dissimilarité de surface entre les tâches (Schwartz et al., 2011). Dans le transfert numérique, ces interférences sont accentuées par la dissimilarité des contextes numériques de présentation.

Une implication spécifique de l'inhibition cognitive dans le transfert numérique provient du fait que les tâches numériques imposent à l'enfant des traitements supplémentaires en mémoire (Barr, 2013). Ces traitements sont liés aux éléments de décors présents sur les interfaces graphiques de présentation, autrement dit au contexte numérique. Les informations délivrées par ces éléments doivent être inhibées pour libérer de l'espace en mémoire de travail, permettant ainsi de traiter efficacement la structure de la tâche de transfert. Le transfert d'apprentissage entre deux tâches numériques implique de nombreuses informations qui occasionnent des interférences à plusieurs niveaux (Diamond, 2013) et par là-même augmentent la probabilité d'une baisse de performances au transfert. Une telle interprétation est cohérente avec l'étude de Thibaut, French, Vezneva, Gérard et Glady (2011). Ces auteurs ont

montré qu'il y a une interaction significative entre la force d'association de deux paires d'items analogiques et la capacité d'inhibition des enfants. Lors d'analogies impliquant des items faiblement associés, les enfants avec de faibles capacités d'inhibition étaient moins performants que les enfants aux capacités d'inhibition élevées. Thibaut et al. (2011) concluent que lorsque des forts concurrents, tant perceptifs que conceptuels, sont présents pendant la recherche en mémoire de l'item approprié, les enfants doivent être capables d'inhiber les items concurrents afin de trouver la solution analogique. Dans cette perspective, il est probable que dans le cas d'interfaces graphiques contenant des éléments de décors différents, les enfants doivent inhiber ces éléments pour accéder à la structure commune aux deux tâches et transférer efficacement. S'ils ne parviennent pas à inhiber, le transfert s'accompagnera probablement d'une baisse de performances.

Le modèle de Richard et al., (1993) soutient que la résolution de la Tour de Hanoï met en conflit des contraintes implicites que s'impose le résolveur et les contraintes explicites que commande la tâche. Le résolveur doit résoudre ce conflit cognitif pour effectuer la tâche efficacement. La Tour de Hanoï est en effet une tâche difficile pour l'enfant. Ceci peut s'expliquer par le fait que le but final et les sous-buts rentrent en compétition (Clément, 2001), ce qui souligne la nécessité d'inhiber tantôt l'un, tantôt les autres, pour pouvoir avancer dans la tâche. Un tel conflit semble mettre en jeu deux systèmes. Le premier est le système heuristique, qui conduit l'enfant à tenter de réduire la distance entre l'état initial et l'état final en effectuant des actions orientées systématiquement vers le but final. Le second est le système algorithmique, qui conduit l'enfant à décomposer le problème en sous-buts pour atteindre le but final (Simon, 1975). Ce dernier est coûteux, car il nécessite une quantité importante de ressources cognitives, et il est par conséquent peu utilisé par l'enfant. Houdé (2000) et Houdé et Borst (2015) soutiennent que lorsque ces deux systèmes rentrent en conflit, comme c'est le cas dans la Tour de Hanoï, l'inhibition cognitive est sollicitée pour arbitrer ce conflit : elle

constitue alors un troisième système, chargé d'inhiber le système 1 pour permettre que s'exprime le système 2. Dans le cas de la résolution de la Tour de Hanoï, l'inhibition semble ainsi requise pour bloquer le système heuristique et favoriser l'activation du système algorithmique, ce qui a pour conséquence que les enfants aux capacités d'inhibition élevées résoudre cette tâche plus efficacement que leurs pairs aux capacités d'inhibition moins élevées.

Dans le cadre du transfert numérique, il est possible que le conflit entre système 1 et système 2 inhérent à la Tour de Hanoï soit accentué par la dis-similarité des tâches et des contextes numériques de présentation, comme le suggèrent nos résultats. Toutes ces dis-similarités représentent autant d'informations à traiter en mémoire de travail, entravant la construction d'une représentation de la tâche de transfert, indispensable pour la réalisation de la tâche. Pour traiter la tâche de transfert, il est en effet nécessaire d'inhiber les informations inappropriées. Le transfert d'apprentissage serait sous-tendu par les fonctions exécutives et particulièrement l'inhibition cognitive (Clerc et al., 2014). Cette recherche a donc permis de jeter un éclairage sur le potentiel rôle de l'inhibition dans le transfert d'apprentissage, comme c'était déjà suggéré dans la littérature (Clerc et al., 2014).

## **7.6. Limites et perspectives**

Ce travail a montré que le transfert numérique est lui aussi influencé par les facteurs identifiés dans le transfert tangible : entraînement, similarité des tâches et des contextes. De plus, cette recherche a montré que l'inhibition cognitive est impliquée dans le transfert numérique. Néanmoins, ce travail comporte des limites qui pourront conduire à des études ultérieures. Premièrement, dans les trois études de ce travail nous avons utilisé uniquement la tâche de Tour de Hanoï. Par conséquent, nos résultats sont à considérer dans le cadre de la résolution de problèmes. Ainsi, pour tester la robustesse des résultats obtenus concernant l'effet de l'entraînement et l'effet des similarités sur la baisse de performances au transfert, ces études

doivent être répliquées avec d'autres tâches. Nous pensons aux tâches d'analogie de type  $A : B :: C : ?$  (Gentner, 1983; Goswami & Brown, 1989) et aux tâches de rappel nécessitant l'utilisation de stratégies mnésiques. Il a été montré que l'interactivité avec l'écran a un effet positif sur l'apprentissage (Haßer et al., 2016) et est bénéfique au transfert entre tâches similaires (Aladé et al., 2016). Suivant cette logique, on pourrait penser que la réalisation de tâches d'analogie de type  $A : B :: C : ?$  sur tablette tactile, par le truchement des interactions contingentes, permettrait aux enfants d'établir la relation entre les items de la première paire pour transférer à la deuxième paire. De même, il serait intéressant de voir comment les enfants transfèrent des stratégies cognitives entre des tâches numériques, car si l'on observe des déficiences d'utilisation dues au transfert (Clerc, 2013; Clerc & Miller, 2013; Clerc et al., 2017, 2021) il pourrait être intéressant de voir quelle serait la qualité du transfert de la stratégie lorsque la nouveauté de la tâche se double de la nouveauté du contexte numérique de présentation.

Une autre limite concerne l'absence de contrôle de la variable « interface graphique ». En effet, dans la troisième étude, nous avons manipulé le contexte d'apprentissage en faisant varier, au sein des interfaces graphiques, les éléments de décor environnant la tâche. Néanmoins, nous n'avons pas utilisé de condition avec un écran neutre, sans éléments de décor, ce qui aurait permis de tester plus directement le rôle de ces derniers. En effet, comme le recommandent Green et al. (2014) et Sala et Gobet (2017) sur les groupes contrôle passif et actif dans le paradigme d'entraînement, de futures recherches pourraient contrôler le facteur interface graphique en présentant une tâche sur un écran neutre, ce qui permettrait de dissocier l'effet de l'interface graphique de celui de l'écran tactile et voir si finalement c'est l'ajout des éléments de décor qui perturbe le transfert entre deux tâches présentées sur une tablette numérique chez l'enfant ou l'interactivité avec l'écran, ou même encore le caractère numérique de la tâche. Dans la littérature sur l'apprentissage multimédia, il a été montré que les détails attrayants perturbent l'apprentissage par le biais d'une charge cognitive élevée (voir Wong &

Adesope, 2021, pour une méta-analyse). Néanmoins, la plupart des études sur la charge cognitive dans les environnements d'apprentissage multimédia ont été menées auprès des étudiants (voir Mutlu-Bayraktara et al., 2019, pour une revue) et on sait encore peu de choses sur l'effet des détails attrayants sur le transfert numérique chez l'enfant.

Par ailleurs, dans toutes nos études, les enfants recevaient des feedbacks correctifs et informatifs. Dans la deuxième étude, une explication de la supériorité de la tablette numérique par rapport au support tangible réside dans le feedback fourni par la tablette, celui-ci étant plus systématique avec la tablette numérique (Ferster et al., 2012; Máñez & Vidal-Abarca, 2020). Néanmoins, l'effet du feedback dans ces études reste une explication parmi d'autres. Des futures recherches pourraient tester cet effet dans le transfert numérique en créant par exemple des conditions sans feedback, avec feedback correctif mais sans explications, puis avec feedback correctif et assorti d'explication.

En outre, dans toutes les études de ce travail, la contribution de l'inhibition cognitive au transfert numérique a été testée via des analyses de régression, montrant seulement des liens prédictifs entre les deux processus. Pour cette raison, nous ne pouvons pas conclure à une causalité entre l'inhibition et le transfert numérique. Des futures recherches pourraient tester une relation de causalité entre ces deux processus, d'une part en comparant les performances de transfert entre groupes indépendants constitués d'enfants aux scores d'inhibition élevés vs faibles ; d'autre part, en faisant varier systématiquement les niveaux d'inhibition requis dans les tâches via le nombre d'éléments interférents, pour tester leur effet sur la réussite au transfert.

Pour terminer, comme la plupart des recherches expérimentales, cette recherche s'est également contentée d'observer et d'interpréter les performances des enfants sur la base des critères préétablis par l'expérimentateur. Or, étudier le transfert en occultant le point de vue de l'apprenant est une approche restrictive, car cela ne laisse pas à l'enfant la possibilité de choisir lui-même ses similarités, ce qui diminue la probabilité d'observer un *far transfer* (Martina &

Schwartz, 2005; Schwartz et al., 2005). Avec sa méthode clinique, Piaget (1937) recommandait d'instaurer un dialogue entre l'enfant et l'expérimentateur pour comprendre comment l'enfant raisonne face à une situation problème. Ainsi, pour comprendre les stratégies utilisées par l'enfant, les futures recherches pourraient exploiter les profils individuels, s'accompagnant de prises d'information auprès de l'enfant en temps réel, c'est-à-dire pendant le déroulement de la tâche. Cette méthodologie a été proposée pour étudier les processus à l'œuvre en résolution de problèmes (Clément, 2003; Welsh & Huizinga, 2005). Observer chez des enfants leurs processus de résolution en temps réel pendant la tâche de transfert pourrait en outre nous renseigner sur l'implication de la métacognition dans le transfert (Clerc & Clément, 2016), et en particulier dans la baisse de performances souvent observée en tâche de transfert. De plus, dans le transfert numérique, nous avons vu que la dis-similarité perceptive des tâches (carrés vs disques), le changement de support de présentation (tangibles vs numériques) et contexte numérique de présentation (éléments de décor plus ou moins similaires) occasionnent une baisse de performances au transfert. Nous ne savons pas néanmoins qui, de la tâche de transfert elle-même ou de l'interface graphique de présentation, occasionne un traitement supplémentaire. Une façon de répondre finement à cette préoccupation serait d'étudier les mouvements oculaires des enfants par eye tracking lors de la réalisation de la tâche de transfert, comme cela s'est déjà fait dans les études antérieures sur l'apprentissage Multimédia (voir Alemdag & Cagiltay, 2018, pour une revue systématique).

## 7.7. Implications générales de la thèse

À l'issue de cette recherche, il convient de faire des suggestions à l'attention des professionnels de l'éducation. Ces suggestions portent principalement sur le transfert d'apprentissage d'une tâche numérique vers une tâche également numérique ou tangible, la baisse de performances au transfert, les facteurs qui permettent de résister à cette baisse de performances, et le regain de performances. Etant donné la survenue systématique de la baisse de performances au transfert et le regain de performances dans les trois études de ce travail doctoral, ces patterns apparaissent robustes. Néanmoins, dans la mesure où un enfant se base activement sur ce qu'il sait déjà pour apprendre ce qu'il ne savait pas encore (Cox, 1997), pour simplifier les tâches rencontrées au quotidien (Helsdingen, van Gog, & van Merriënboer, 2011), le transfert joue un rôle central dans le développement cognitif et les apprentissages. Dans ce sens, la robustesse du phénomène de la baisse de performances au transfert reste problématique et mérite d'être mieux comprise, pour pouvoir in fine être mieux prévenue et/ou compensée. Pour cette raison, l'école se doit non seulement de fournir aux apprenants des moyens d'apprentissage efficaces, mais aussi de les mettre dans des situations qui favorisent le transfert d'apprentissage.

Comme certains chercheurs l'ont déjà fait (Hirsh-Pasek et al., 2015; Major et al., 2017), cette recherche recommande également d'utiliser les tablettes numériques à l'école. Il a en effet été montré dans la deuxième étude que les enfants qui apprenaient sur la tablette numérique transféraient mieux dans la tâche tangible que les enfants qui apprenaient avec un support tangible pour transférer dans une tâche numérique. Les feedbacks systématiques fournis par la tablette constituent une des explications de cette supériorité de la tablette par rapport au support tangible, ce qui montre que la tablette numérique a des fonctions pédagogiques qui peuvent compléter l'expertise fournie par l'enseignant. Si l'enseignant ne peut par exemple pas fournir à l'élève des feedbacks systématiques tout au long de la réalisation d'une tâche, la tablette serait

un bon moyen pour combler cette insuffisance. Ainsi, les professionnels de l'éducation peuvent réfléchir sur le contenu et l'élaboration des apprentissages, puis implémenter les tâches sur tablette numérique. Il ne s'agit pas de remplacer les éducateurs par les tablettes, mais que celles-ci viennent soutenir les enseignants dans leur travail.

Par ailleurs, bien que cette recherche ait montré que l'apprentissage sur tablette a un effet bénéfique sur le transfert d'apprentissage en résolution de problème, il reste que le passage à la tâche de transfert tant tangible que numérique s'accompagne d'une performance qui décline. Néanmoins, cette baisse de performances est moins marquée lorsque les deux tâches sont intégrées, c'est-à-dire présentées toutes deux sur support numérique ou toutes deux sur support tangible. Pour cette raison, si les enseignants font réaliser aux enfants des exercices sur des tablettes numériques, nous leur recommandons de présenter aux enfants les tâches d'évaluations également sur les tablettes numériques, ceci parce qu'au vu des résultats de ce travail doctoral, apprendre sur tablette numérique ne semble pas permettre de généraliser facilement l'apprentissage à tous les supports. De plus, notre troisième étude a montré que les éléments de décor qui environnent la tâche au sein de l'interface d'une tablette numérique perturbent le transfert d'apprentissage s'ils diffèrent trop de ceux qui environnaient la tâche principale. Ils occasionnent en effet un traitement supplémentaire et conduisent à une charge cognitive extrinsèque. Dans cette perspective, les professionnels de l'éducation et les concepteurs des applications des tablettes numériques devraient implémenter les tâches sur des interfaces neutres, sans éléments de décor, sauf si ceux-ci sont pertinents pour la compréhension de la tâche. Ainsi, tous les éléments contenus dans l'interface graphique doivent servir à l'apprentissage, à la compréhension et à l'acquisition de la connaissance visée, faute de quoi l'apprentissage peut être détérioré (Mayer, 2008). Au vu de nos résultats, ceci semble également s'appliquer aux tâches de transfert.

En outre, la différence des interfaces de présentation des tâches principale et de transfert occasionne des interférences. Dans ce cas, il faut que les enfants aient des bonnes capacités d'inhibition pour contrôler ces interférences et transférer efficacement. Inhiber reste néanmoins difficile pour les enfants à l'entrée à l'école élémentaire. Les enfants qui ont des bonnes capacités d'inhibition seraient par ailleurs plus efficaces pour transférer, créant ainsi des différences individuelles que pourtant l'école est censée réduire. Pour ces raisons, la présentation de la tâche de transfert sur une interface graphique similaire à celle de la tâche principale, ou sur une interface neutre, est à recommander.

Par ailleurs, dans toutes les études de cette thèse, les résultats ont montré que les enfants récupéraient leurs performances juste après le premier essai de transfert. Dans le cadre des évaluations scolaires, ce résultat suggère qu'après les exercices, une seule évaluation ne suffirait pas pour déterminer le niveau d'une compétence chez l'enfant. En effet, Sweller (2005) faisait déjà remarquer qu'apprendre consiste à construire des schémas de connaissances et à les automatiser pour qu'ils soient applicables à plusieurs situations similaires. Ceci suppose que lorsque les enfants s'exercent pour l'acquisition d'une compétence, il leur faut un certain temps d'adaptation pour utiliser cette compétence dans un autre problème similaire. Ainsi, lorsque les enfants passent des tâches d'exercices aux tâches d'évaluations, il est probable que leurs performances chutent, mais qu'ils les récupèrent ensuite au fil des essais. À l'issue de ces résultats, nous invitons donc les enseignants à multiplier les tâches d'évaluations avant de déterminer fermement le niveau d'apprentissage des enfants.

---

## CONCLUSION GENERALE

---

Ce travail de thèse voulait répondre à un questionnement : est-il possible d'observer un transfert numérique en résolution de problème chez l'enfant ? Ce type de transfert est-il également influencé par les facteurs identifiés dans le transfert tangible ? Pour répondre à ces questions, nous nous sommes appuyés sur les modèles théoriques du transfert d'apprentissage, du contrôle exécutif et de l'apprentissage sur les outils numériques. Nous avons mené trois études dont les résultats ont montré, comme pour le transfert tangible, que le transfert numérique en résolution de problèmes s'accompagne d'une baisse de performances. Nos études ont respectivement montré qu'un entraînement hautement spécifique à l'apprentissage visé, une similarité des supports de présentation des tâches, et une similarité conjointe des tâches et de leurs contextes numériques de présentation (éléments de décor environnant la tâche présentée sur l'interface graphique) permettent néanmoins de résister à cette baisse de performances. Cette recherche doctorale a par ailleurs permis de montrer que les processus qui sous-tendent le transfert tangible (entraînement et similarités) sont également observés dans le transfert numérique. Dans cette perspective, ce travail permet de nuancer l'hypothétique effet facilitateur des tablettes numériques sur le transfert d'apprentissage, du moins en résolution de problèmes.

Cette thèse a également souligné d'une part, l'implication de l'inhibition cognitive dans le transfert numérique en résolution de problèmes. D'autre part, elle met en lumière le pattern de regain de performances qui n'est que trop peu étudié dans le domaine du transfert d'apprentissage. Ainsi, les résultats de ce travail ébauchent des nouvelles perspectives pour une meilleure connaissance du rôle de l'inhibition dans le transfert d'apprentissage, et des processus métacognitifs qui pourraient expliquer le pattern de regain de performances observé dans ce travail. Ils renseignent aussi les professionnels de l'éducation et des concepteurs des interfaces graphiques des tablettes numériques, sur les conditions d'apprentissage et de transfert à partir de ces outils.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdul Rahman, A., Carroll, D. J., Espy, K. A., & Wiebe, S. A. (2017). Neural correlates of response inhibition in early childhood: Evidence from a Go/No-Go Task. *Developmental Neuropsychology*, 42(5), 336-350.  
<https://doi.org/10.1080/87565641.2017.1355917>
- Abreu-Mendoza, R. A., Coulanges, L., Ali, K., Powell, A. B., & Rosenberg-Lee, M. (2020). Children's discrete proportional reasoning is related to inhibitory control and enhanced by priming continuous representations. *Journal of Experimental Child Psychology*, 199, 104931. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2020.104931>
- Académie des sciences (2013) *L'enfant et les écrans*, Un Avis de l'Académie des sciences. Paris : Le Pommier.
- Adi-Japha, E., & Brestel, G. (2020). Motor skill learning with impaired transfer by children with developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 103, 103671. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2020.103671>
- Ahmed, S. F., Tang, S., Waters, N. E., & Davis-Kean, P. (2019). Executive function and academic achievement : Longitudinal relations from early childhood to adolescence. *Journal of Educational Psychology*, 111(3), 446-458.  
<https://doi.org/10.1037/edu0000296>
- Aïte, A., Cassotti, M., Linzarini, A., Osmont, A., Houdé, O., & Borst, G. (2018). Adolescents' inhibitory control : Keep it cool or lose control. *Developmental Science*, 21(1), e12491.  
<https://doi.org/10.1111/desc.12491>
- Akiguet-Bakong, S. (2008). Effet de la compréhension de l'énoncé sur la résolution des problèmes arithmétiques. *Corela. Cognition, Représentation, Langage*, 6(2), 1-13.  
<https://doi.org/10.4000/corela.300>
- Aladé, F., Lauricella, A. R., Beaudoin-Ryan, L., & Wartella, E. (2016). Measuring with Murray : Touchscreen technology and preschoolers' STEM learning. *Computers in Human Behavior*, 62, 433-441. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.03.080>
- Alemdag, E., & Cagiltay, K. (2018). A systematic review of eye tracking research on multimedia learning. *Computers & Education*, 125, 413-428.  
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.06.023>
- Amadiou, F., Mulet, J., Van der Linden, J., Lombard, J., & Van De Leemput, C. (2019). Acceptabilité des technologies d'apprentissage mobile : le cas des tablettes. *Education Permanente*, 219, 31-40.

- Amadiou, F., & Tricot, A. (2006). Utilisation d'un hypermédia et apprentissage : deux activités concurrentes ou complémentaires ? *Psychologie Française*, 51(1), 5-23.  
<https://doi.org/10.1016/j.psfr.2005.12.001>
- Amadiou, F., & Tricot, A. (2014). *Apprendre avec le numérique : mythes et réalités*. Retz.
- Anderson, D. R., & Pempek, T. A. (2005). Television and very young children. *American Behavioral Scientist*, 48(5), 505-522. <https://doi.org/10.1177/0002764204271506>
- Augustinova, M., & Ferrand, L. (2014). Automaticity of word reading : Evidence from the semantic stroop paradigm. *Current Directions in Psychological Science*, 23(5), 343-348.  
<https://doi.org/10.1177/0963721414540169>
- Baccino, T., & Draï-Zerbib, V. (2012). L'usage des tablettes numériques : évaluations ergonomiques. *Communication au Colloque Ecritech*.
- Baddeley, A. (1986). Modularity, mass-action and memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 38(4), 527-533.  
<https://doi.org/10.1080/14640748608401613>
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer : A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 417-423. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01538-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01538-2)
- Baillargeon, R., Spelke, E. S., & Wasserman, S. (1985). Object permanence in five-month-old infants. *Cognition*, 20(3), 191-208. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(85\)90008-3](https://doi.org/10.1016/0010-0277(85)90008-3)
- Barnett, S. M., & Ceci, S. J. (2002). When and where do we apply what we learn? A taxonomy for far transfer. *Psychological Bulletin*, 128(4), 612-637. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.128.4.612>
- Barr, R. (2010). Transfer of learning between 2D and 3D sources during infancy : Informing theory and practice. *Developmental Review*, 30(2), 128-154.  
<https://doi.org/10.1016/j.dr.2010.03.001>
- Barr, R. (2013). Memory constraints on infant learning from picture books, television, and touchscreens. *Child Development Perspectives*, 7(4), 205-210.  
<https://doi.org/10.1111/cdep.12041>
- Barr, R., Zack, E., Garcia, A., & Muentener, P. (2008). Infants' attention and responsiveness to television increases with prior exposure and parental interaction. *Infancy*, 13(1), 30-56.  
<https://doi.org/10.1080/15250000701779378>
- Basque, J. (2004). Le transfert d'apprentissage : qu'en disent les « contextualistes »? Dans A. Presseau et M. Frenay (dir.), *Le transfert des apprentissages : Comprendre pour mieux intervenir* (pp. 49-76). SainteFoy, Canada : Presses de l'Université Laval.

- Bellec, D., & Tricot, A. (2013). Étude des systèmes techniques en enseignement secondaire : apports de la théorie de la charge cognitive. *RDST. Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, (8), 47-64.  
<https://doi.org/10.4000/rdst.761>
- Best, J. R., & Miller, P. H. (2010). A developmental perspective on executive function. *Child Development*, 81(6), 1641-1660. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01499.x>
- Best, J. R., Miller, P. H., & Jones, L. L. (2009). Executive functions after age 5: Changes and correlates. *Developmental Review*, 29(3), 180-200.  
<https://doi.org/10.1016/j.dr.2009.05.002>
- Best, J. R., Miller, P. H., & Naglieri, J. A. (2011). Relations between executive function and academic achievement from ages 5 to 17 in a large, representative national sample. *Learning and Individual Differences*, 21(4), 327-336.  
<https://doi.org/10.1016/j.lindif.2011.01.007>
- Bjorklund, D. F., Dukes, C., & Douglas-Brown, R. (2009). The Development of memory strategies. In M. L. Courage, & N. Cowan, (Eds.), *The development of memory in infancy and childhood* (pp.145-175). Hove: Psychology Press.
- Bjorklund, D. F., Miller, P. H., Coyle, T. R., & Slawinski, J. L. (1997). Instructing children to use memory strategies : Evidence of utilization deficiencies in memory training studies. *Developmental Review*, 17(4), 411-441. <https://doi.org/10.1006/drev.1997.0440>
- Bjorklund, D. F., & Causey, K. B. (2017). *Children's thinking : Cognitive development and individual differences*. Los Angeles : Sage.
- Blakemore, S.J. (2018). The social brain in adolescence. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(4), 267-277. <http://doi.org/10.1038/nrn2353>
- Blöte, A. W., Resing, W. C. M., Mazer, P., & Van Noort, D. A. (1999). Young children's organizational strategies on a same-different task : A microgenetic study and a training study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 74(1), 21-43.  
<https://doi.org/10.1006/jecp.1999.2508>
- Boot, W. R., Kramer, A. F., Simons, D. J., Fabiani, M., & Gratton, G. (2008). The effects of video game playing on attention, memory, and executive control. *Acta Psychologica*, 129(3), 387-398. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2008.09.005>
- Borst, G., Aïte, A., & Houdé, O. (2015). Inhibition of misleading heuristics as a core mechanism for typical cognitive development : Evidence from behavioural and brain-imaging studies. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 57, 21-25.  
<https://doi.org/10.1111/dmcn.12688>

- Borst, G., & Houde, O. (2014). Inhibitory control as a core mechanism for cognitive development and learning at school. *Perspectives on Language and Literacy*, 40(2), 40-44
- Borst, G., Poirel, N., Pineau, A., Cassotti, M., & Houdé, O. (2013). Inhibitory control efficiency in a Piaget-like class-inclusion task in school-age children and adults : A developmental negative priming study. *Developmental Psychology*, 49(7), 1366-1374.
- Bosc-Miné, C. (2014). Caractéristiques et fonctions des feed-back dans les apprentissages. *L'Année Psychologique*, 114(02), 315-353.  
<https://doi.org/10.4074/S000350331400205x>
- Boucheix, J. M. (2018). Apprendre avec des images et des animations multimédias interactives. In L. Ferrand, B. Lété, & C. Thévenot (Eds.), *Psychologie cognitive des apprentissages scolaires* (pp. 91-104). Paris : Dunod.
- Bracke, D. (2008). Vers un modèle théorique du transfert : Les contraintes à respecter. *Revue des Sciences de l'Education*, 24(2), 235-266. <https://doi.org/10.7202/502010ar>
- Brangier, E., & Barcenilla, J. (2003). *Concevoir un produit facile à utiliser*. Paris : Editions d'organisation.
- Brangier, E., & Bastien, J. M. C. (2010). L'évolution de l'ergonomie des produits informatiques : accessibilité, utilisabilité, émotionnalité et influençabilité. In G. Valléry, M.-C. Le Port, & M. Zouinar (Eds.), *Ergonomie, conception de produits et services médiatisés*. Paris : Puf.  
<https://doi.org/10.3917/puf.lepo.2010.01.0307>
- Brown, A. L., Kane, M. J., & Echols, C. H. (1986). Young children's mental models determine analogical transfer across problems with a common goal structure. *Cognitive Development*, 1(2), 103-121. [https://doi.org/10.1016/S0885-2014\(86\)80014-4](https://doi.org/10.1016/S0885-2014(86)80014-4)
- Brown, A. L., & Kane, M. J. (1988). Preschool children can learn to transfer : Learning to learn and learning from example. *Cognitive Psychology*, 20(4), 493-523.  
[https://doi.org/10.1016/0010-0285\(88\)90014-X](https://doi.org/10.1016/0010-0285(88)90014-X)
- Carlson, S. M., Davis, A. C., & Leach, J. G. (2005). Less is More : Executive function and symbolic representation in preschool children. *Psychological Science*, 16(8), 609-616.  
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2005.01583.x>
- Carr, M., Kurtz, B. E., Schneider, W., Turner, L. A., & Borkowski, J. G. (1989). Strategy acquisition and transfer among American and German children: Environmental influences on metacognitive development. *Developmental Psychology*, 25(5), 765-771.  
<https://doi.org/10.1037/0012-1649.25.5.765>

- Catale, C., & Meulemans, T. (2009). The Real Animal Size Test (RAST) a new measure of inhibitory control for young children. *European Journal of Psychological Assessment*, 25(2), 83-91.  
<https://doi.org/10.1027/1015-5759.25.2.83>
- Cauzinille-Marmèche, E. (1990). Apprendre à utiliser ses connaissances pour la résolution de problèmes : analogie et transfert. *Bulletin de Psychologie*, 399(3/5), 156-164.
- Cartwright, K. B., Bock, A. M., Clause, J. H., Coppage August, E. A., Saunders, H. G., & Schmidt, K. J. (2020). Near- and far-transfer effects of an executive function intervention for 2nd to 5th-grade struggling readers. *Cognitive Development*, 56, 2-11.  
<https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2020.100932>
- Chanquoy, L., Tricot, A., & Sweller, J. (2007). *La charge cognitive : Théorie et applications*. Paris : Armand Colin.
- Chang, H., Rosenberg-Lee, M., Qin, S., & Menon, V. (2019). Faster learners transfer their knowledge better: Behavioral, mnemonic, and neural mechanisms of individual differences in children's learning. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 40, 2-14.  
<https://doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100719>
- Chen, Z., Honomichl, R., Kennedy, D., & Tan, E. (2016). Aiming to complete the matrix : Eye-movement analysis of processing strategies in children's relational thinking. *Developmental Psychology*, 52(6), 867-878. <https://doi.org/10.1037/dev0000113>
- Chen, Z., & Klahr, D. (1999). All other things being equal : Acquisition and transfer of the control of variables strategy. *Child Development*, 70(5), 1098-1120.  
<https://doi.org/10.1111/1467-8624.00081>
- Chi, M. T. H., & VanLehn, K. A. (2012). Seeing deep structure from the interactions of surface features. *Educational Psychologist*, 47(3), 177-188.  
<https://doi.org/10.1080/00461520.2012.695709>
- Clément, E. (1997). Knowledge of domain effects in problem representation : The case of tower of Hanoi isomorphs. *Thinking & Reasoning*, 3(2), 133-157.
- Clément, E. (2001). Relation entre implicite et explicite dans l'activité de résolution de problèmes par des enfants de 7 ans. *A.N.A.E. Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, 13(5), 65, 218-223.
- Clément, E. (2003). L'analyse de l'activité dans les situations de résolution de problèmes. *Psychologie et Psychométrie*, 24(4), 25-36.

- Clerc, J. (2013). Les déficiences d'utilisation stratégique chez l'enfant à la lumière de l'autorégulation : Étape développementale ou caractéristique différentielle ? *L'Année Psychologique*, 113(02), 287-318. <https://doi.org/10.4074/S0003503313002078>
- Clerc, J., & Clément, E. (2016). Metacognition and cognitive flexibility in transfer of learning. In J. Benson (Ed.), *Metacognition : Theory, performance and current research* (pp. 17-42). NY: Nova Science Publishers.
- Clerc, J., Leclercq, M., Paik, J., & Miller, P. H. (2021). Cognitive flexibility and strategy training allow young children to overcome transfer-Utilization Deficiencies. *Cognitive Development*, 57, 2-15. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2020.100997>
- Clerc, J., & Leconte-Lambert, C. (2005). L'école maternelle a-t-elle vocation à enseigner le transfert de stratégies cognitives ? *Spirale. Revue de Recherches en Education*, 36(1), 27-35. <https://doi.org/10.3406/spira.2005.1322>
- Clerc, J., & Miller, P. H. (2013). Utilization deficiencies and transfer of strategies in preschoolers. *Cognitive Development*, 28(1), 76-93. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2012.09.003>
- Clerc, J., Miller, P. H., & Cosnefroy, L. (2014). Young children's transfer of strategies : Utilization deficiencies, executive function, and metacognition. *Developmental Review*, 34(4), 378-393. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2014.10.002>
- Clerc, J., Rémy, L., & Leclercq, M. (2017). Quand le transfert d'une stratégie cognitive devient efficace : Une étude longitudinale entre 4 et 5 ans. *Enfance*, 2017(02), 217-237. <https://doi.org/10.4074/S001375451700204X>
- Cox, B. D. (1997). The rediscovery of the active learner in adaptive contexts: a developmental-historical analysis of transfer of training. *Educational Psychologist*, 32(1), 41-55. [https://doi.org/10.1207/s15326985ep3201\\_4](https://doi.org/10.1207/s15326985ep3201_4)
- Crahay, M. (2013). *Psychologie de l'éducation*. Paris : Puf.
- DeLeeuw, K. E., & Mayer, R. M. (2008). A comparison of three measures of cognitive load: Evidence for separable measures of intrinsic, extraneous and germane load. *Journal of Educational Psychology*, 100(1), 223-234. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.100.1.223>
- DeLoache, J. S. (2000). Dual representation and young children's use of scale models. *Child Development*, 71(2), 329-338. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00148>
- Detable, C., & Vinter, A. (2006). Les capacités de transfert en situation d'apprentissage implicite chez des préadolescents présentant un retard mental. *Psychologie Française*, 51(2), 189-203. <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2005.11.002>

- Diamond, A. (1990). Developmental time course in human infants and infant monkeys, and the neural bases of, inhibitory control in reaching a. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 608(1), 637-676.  
<https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1990.tb48900.x>
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, 64(1), 135-168.  
<https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Diamond, A., & Ling, D. S. (2016). Conclusions about interventions, programs, and approaches for improving executive functions that appear justified and those that, despite much hype, do not. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 18, 34-48.  
<https://doi.org/10.1016/j.dcn.2015.11.005>
- Didierjean, A. (2001). Apprendre à partir d'exemples : Abstraction de règles et/ou mémoire d'exemplaires ? *L'Année Psychologique*, 101(2), 325-348.  
<https://doi.org/10.3406/psy.2001.29560>
- Duan, X., Wei, S., Wang, G., & Shi, J. (2010). The relationship between executive functions and intelligence on 11-to 12-year-old children. *Psychological Test and Assessment Modeling*, 52(4), 419.
- Durkin, K., & Blades, M. (2009). Young people and the media: Special issue introduction. *British Journal of Developmental Psychology*, 27, 1, 1-12.
- Eisen, S., & Lillard, A. S. (2016). Just Google It: Young children's preferences for touchscreens versus books in hypothetical learning tasks. *Frontiers in Psychology*, 7, 1-8.  
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01431>
- Eisen, S., & Lillard, A. S. (2020). Learning from apps and objects : The human touch. *Mind, Brain, and Education*, 14(1), 16-23. <https://doi.org/10.1111/mbe.12224>
- Elsner, B., & Schellhas, B. (2012). The Acquisition of flexible tool use in preschoolers : The impact of prior experience. *Zeitschrift Für Psychologie*, 220(1), 44-49.  
<https://doi.org/10.1027/2151-2604/a000090>
- Ferrer, F., Belvís, E., & Pàmies, J. (2011). Tablet PCs, academic results and educational inequalities. *Computers & Education*, 56(1), 280-288.  
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.07.018>
- Ferster, B., Hammond, T. C., Alexander, R. C., & Lyman, H. (2012). Automated formative assessment as a tool to scaffold student documentary writing. *Journal of Interactive Learning Research*, 23(1), 81-99.

- Forsyth, B. R. (2018). Defining far transfer via thematic similarity. *Cogent Psychology*, 5(1), 1523348. <https://doi.org/10.1080/23311908.2018.1523348>
- Friedman, N. P., & Miyake, A. (2004). The relations among inhibition and interference control functions : A latent-variable analysis. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133(1), 101-135. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.133.1.101>
- Fujisawa, K. K., Todo, N., & Ando, J. (2017). Genetic and environmental influences on the development and stability of executive functions in children of preschool age : A longitudinal study of japanese twins. *Infant and Child Development*, 26(3), e1994. <https://doi.org/10.1002/icd.1994>
- Gamo, S., Sander, E., & Richard, J.-F. (2010). Transfer of strategy use by semantic recoding in arithmetic problem solving. *Learning and Instruction*, 20(5), 400-410. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.04.001>
- Garon, N., Bryson, S. E., & Smith, I. M. (2008). Executive function in preschoolers : A review using an integrative framework. *Psychological Bulletin*, 134(1), 31-60. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.134.1.31>
- Gellert, A. S., Arnbak, E., Wischmann, S., & Elbro, C. (2021). Morphological intervention for students with limited vocabulary knowledge : Short- and long-term transfer effects. *Reading Research Quarterly*, 56(3), 583-601. <https://doi.org/10.1002/rrq.325>
- Gentner, D. (1983). Structure-Mapping : A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, 7(2), 155-170. [https://doi.org/10.1207/s15516709cog0702\\_3](https://doi.org/10.1207/s15516709cog0702_3)
- Gentner, D., & Toupin, C. (1986). Systematicity and surface similarity in the development of analogy. *Cognitive Science*, 10(3), 277-300. [https://doi.org/10.1207/s15516709cog1003\\_2](https://doi.org/10.1207/s15516709cog1003_2)
- Gerstadt, C. L., Hong, Y. J., & Diamond, A. (1994). The relationship between cognition and action: performance of children 3;12–7 years old on a stroop-like day-night test. *Cognition*, 53(2), 129-153. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(94\)90068-X](https://doi.org/10.1016/0010-0277(94)90068-X)
- Gheloube, F. (2007). Etude de la capacité d'inhibition pour évaluer le niveau de compréhension des élèves: cas des élèves de 6eme « du lycée d'application Nelson Mandela ». *Annales de l'Université Omar Bongo*, (13), 217-232.
- Giedd, J. N. (2012). The Digital revolution and adolescent brain evolution. *Journal of Adolescent Health*, 51(2), 101-105. <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2012.06.002>
- Gick, M. L., & Holyoak, K. J. (1987). The cognitive basis of knowledge transfer. In *Transfer of Learning*, S.M. Cormier & J. D. Hagman (Eds.), *Transfer of learning: Contemporary research and applications* (pp. 9-46). San Diego : Academic Press.

- Glogger, I., Schwonke, R., Holzäpfel, L., Nückles, M., & Renkl, A. (2012). Learning strategies assessed by journal writing : Prediction of learning outcomes by quantity, quality, and combinations of learning strategies. *Journal of Educational Psychology, 104*(2), 452-468. <https://doi.org/10.1037/a0026683>
- Godden, D. R., & Baddeley, A. D. (1975). context-dependent memory in two natural environments : on land and underwater. *British Journal of Psychology, 66*(3), 325-331. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1975.tb01468.x>
- Goldstone, R. L., & Day, S. B. (2012). Introduction to “new conceptualizations of transfer of learning”. *Educational Psychologist, 47*(3), 149-152. <https://doi.org/10.1080/00461520.2012.695710>
- Goldstone, R. L., & Wilensky, U. (2008). Promoting transfer by grounding complex systems principles. *Journal of the Learning Sciences, 17*(4), 465-516. <https://doi.org/10.1080/10508400802394898>
- Goswami, U., & Brown, A. L. (1989). Melting chocolate and melting snowmen : Analogical reasoning and causal relations. *Cognition, 35*, 69-95. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(90\)90037-K](https://doi.org/10.1016/0010-0277(90)90037-K)
- Green, C. S., Strobach, T., & Schubert, T. (2014). On methodological standards in training and transfer experiments. *Psychological Research, 78*(6), 756-772. <https://doi.org/10.1007/s00426-013-0535-3>
- Hamari, J., Shernoff, D. J., Rowe, E., Coller, B., Asbell-Clarke, J., & Edwards, T. (2016). Challenging games help students learn : An empirical study on engagement, flow and immersion in game-based learning. *Computers in Human Behavior, 54*, 170-179. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.07.045>
- Hattie, J., & Timperley, H. (2007). The power of feedback. *Review of Educational Research, 77*(1), 81-112. <https://doi.org/10.3102/003465430298487>
- Haßler, B., Major, L., & Hennessy, S. (2016). Tablet use in schools : A critical review of the evidence for learning outcomes. *Journal of Computer Assisted Learning, 32*(2), 139-156. <https://doi.org/10.1111/jcal.12123>
- Hauf, P., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2007). Baby do–baby see! *Cognitive Development, 22*(1), 16-32. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2006.09.002>
- Hayne, H., Herbert, J., & Simcock, G. (2003). Imitation from television by 24-and 30-month-olds. *Developmental Science, 6*(3), 254-261. <https://doi.org/10.1111/1467-7687.00281>

- He, Z.-H., Li, B.-H., & Yin, W.-G. (2019). Executive function and mental rotation during middle childhood : The effect of age. *The Journal of Genetic Psychology, 180*(2-3), 96-102. <https://doi.org/10.1080/00221325.2019.1582474>
- Helsdingen, A., van Gog, T., & van Merriënboer, J. (2011). The effects of practice schedule and critical thinking prompts on learning and transfer of a complex judgment task. *Journal of Educational Psychology, 103*(2), 383-398. <https://doi.org/10.1037/a0022370>
- Hendry, A., Jones, E. J. H., & Charman, T. (2016). Executive function in the first three years of life : Precursors, predictors and patterns. *Developmental Review, 42*, 1-33. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2016.06.005>
- Henry, L. and Bettenay, C. (2010). The assessment of executive functioning in children. *Child and Adolescent Mental Health, 15*(2), 110-119. <https://doi.org/10.1111/j.1475-3588.2010.00557.x>
- Henry, L. A., Messer, D. J., & Nash, G. (2014). Testing for near and far transfer effects with a Short, face-to-face adaptive working memory training intervention in typical children : Working memory training intervention. *Infant and Child Development, 23*(1), 84-103. <https://doi.org/10.1002/icd.1816>
- Hirsh-Pasek, K., Zosh, J. M., Golinkoff, R. M., Gray, J. H., Robb, M. B., & Kaufman, J. (2015). Putting education in “educational” apps : Lessons from the science of learning. *Psychological Science in the Public Interest, 16*(1), 3-34. <https://doi.org/10.1177/1529100615569721>
- Hoareau, L., Tazouti, Y., Dinet, J., Thomas, A., Luxembourger, C., Hubert, B., & Jarlégan, A. (2020). Co-designing a new educational tablet app for preschoolers. *Computers in the Schools, 37*(4), 234-252. <https://doi.org/10.1080/07380569.2020.1830253>
- Holyoak, K. J., & Koh, K. (1987). Surface and structural similarity in analogical transfer. *Memory & Cognition, 15*(4), 332-340. <https://doi.org/10.3758/BF03197035>
- Honomichl, R. D., & Chen, Z. (2012). The role of guidance in children’s discovery learning. *Cognitive Science, 615*-622. <https://doi.org/10.1002/wcs.1199>
- Houdé O. (1995). *Rationalité, développement et inhibition*. Paris : Puf.
- Houdé, O. (1997). Numerical development: From the infant to the child. Wynn's (1992) paradigm in 2-and 3-year olds. *Cognitive Development, 12*(3), 373-391. [https://doi.org/10.1016/S0885-2014\(97\)90009-5](https://doi.org/10.1016/S0885-2014(97)90009-5)
- Houdé, O. (2000). Inhibition and cognitive development : Object, number, categorization, and reasoning. *Cognitive Development, 15*(1), 63-73. [https://doi.org/10.1016/S0885-2014\(00\)00015-0](https://doi.org/10.1016/S0885-2014(00)00015-0)

- Houdé, O. (2017). *Apprendre à résister. Pour l'école, contre la terreur*. Paris : Le Pommier.
- Houdé, O., & Borst, G. (2015). Evidence for an inhibitory-control theory of the reasoning brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 1-5. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00148>
- Houdé, O., & Borst, G. (2014). Measuring inhibitory control in children and adults : Brain imaging and mental chronometry. *Frontiers in Psychology*, 5, 1-7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00616>
- Houdé, O., & Guichart, E. (2001). Negative priming effect after inhibition of number/length interference in a Piaget-like task. *Developmental Science*, 4(1), 119-123. <https://doi.org/10.1111/1467-7687.00156>
- Hsiao, H.-S., & Chen, J.-C. (2016). Using a gesture interactive game-based learning approach to improve preschool children's learning performance and motor skills. *Computers & Education*, 95, 151-162. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.01.005>
- Huber, B., Tarasuik, J., Antoniou, M. N., Garrett, C., Bowe, S. J., & Kaufman, J. (2016). Young children's transfer of learning from a touchscreen device. *Computers in Human Behavior*, 56, 56-64. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.11.010>
- Ikeda, Y., Okuzumi, H., & Kokubun, M. (2013). Age-related trends of stroop-like interference in animal size tests in 5- to 12-year-old children and young adults. *Child Neuropsychology*, 19(3), 276-291. <https://doi.org/10.1080/09297049.2012.658364>
- Jacobson, M. J., Goldwater, M., Markauskaite, L., Lai, P. K., Kapur, M., Roberts, G., & Hilton, C. (2020). Schema abstraction with productive failure and analogical comparison : Learning designs for far across domain transfer. *Learning and Instruction*, 65, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2019.101222>
- Jant, E. A., Haden, C. A., Uttal, D. H., & Babcock, E. (2014). Conversation and object manipulation influence children's learning in a museum. *Child Development*, 85, 5, 2029-2045. <https://doi.org/10.1111/cdev.12252>
- Johnson, G. M. (2013). Tactile input features of hardware: Cognitive processing in relation to digital device. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 41(2), 464-469. <http://hdl.handle.net/20.500.11937/39466>
- Kelly, D. J., Duarte, S., Meary, D., Bindemann, M., & Pascalis, O. (2019). Infants rapidly detect human faces in complex naturalistic visual scenes. *Developmental Science*, 22(6). <https://doi.org/10.1111/desc.12829>

- Johnstone, S. J., Dimoska, A., Smith, J. L., Barry, R. J., Pleffer, C. B., Chiswick, D., & Clarke, A. R. (2007). The development of stop-signal and Go/Nogo response inhibition in children aged 7–12 years: Performance and event-related potential indices. *International Journal of Psychophysiology*, *63*(1), 25-38.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2006.07.001>
- Kirkorian, H. L., Choi, K., & Pempek, T. A. (2016). Toddlers' word learning from contingent and noncontingent video on touch screens. *Child Development*, *87*(2), 405-413.  
<https://doi.org/10.1111/cdev.12508>
- Klahr, D., & Chen, Z. (2011). Finding one's place in transfer space. *Child Development Perspectives*, *5*(3), 196-204. <https://doi.org/10.1111/j.1750-8606.2011.00171.x>
- Klahr, D., & Robinson, M. (1981). Formal assessment of problem-solving and planning processes in preschool children. *Cognitive Psychology*, *13*(1), 113-148.  
[https://doi.org/10.1016/0010-0285\(81\)90006-2](https://doi.org/10.1016/0010-0285(81)90006-2)
- Klenberg, L., Korkman, M., & Lahti-Nuutila, P. (2001). Differential development of attention and executive functions in 3- to 12-year-old finnish children. *Developmental Neuropsychology*, *20*(1), 407-428. [https://doi.org/10.1207/S15326942DN2001\\_6](https://doi.org/10.1207/S15326942DN2001_6)
- Korkman, M., Kirk, U., & Kemp, S. (1998). *NEPSY: A developmental neuropsychological assessment*. San Antonio, TX: The Psychological Corporation.
- Lamnina, M., & Chase, C. C. (2019). Developing a thirst for knowledge : How uncertainty in the classroom influences curiosity, affect, learning, and transfer. *Contemporary Educational Psychology*, *59*, 101785. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2019.101785>
- Lamnina, M., & Chase, C. C. (2021). Uncertain instruction: effects on curiosity, learning, and transfer. *Instructional Science*, 1-25. <https://doi.org/10.1007/s11251-021-09557-2>
- Lauricella, A. R., Pempek, T. A., Barr, R., & Calvert, S. L. (2010). Contingent computer interactions for young children's object retrieval success. *Journal of Applied Developmental Psychology*, *31*(5), 362-369.  
<https://doi.org/10.1016/j.appdev.2010.06.002>
- Léger, L. (2016). *Manuel de psychologie*. Paris : Dunod.
- Lehalle, H. (2014). Introduction : Quel modèle de développement ? *Enfance*, (3), 197-203.
- Lillard, A. S., & Peterson, J. (2011). The immediate impact of different types of television on young children's executive function. *Pediatrics*, *128*(4), 644-649.  
<https://doi.org/10.1542/peds.2010-1919>

- Linzarini, A. (2017). *Développement et contrôle cognitifs : généralité et automatisation des processus inhibiteurs*. Thèse de doctorat non publiée. Université de Paris Sorbonne Cité.
- Lorch, R. F., Lorch, E. P., Freer, B. D., Dunlap, E. E., Hodell, E. C., & Calderhead, W. J. (2014). Using valid and invalid experimental designs to teach the control of variables strategy in higher and lower achieving classrooms. *Journal of Educational Psychology*, *106*(1), 18-35.  
<https://doi.org/10.1037/a0034375>
- Lubin, A., Rossi, S., Lanoë, C., Vidal, J., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Expertise, inhibitory control and arithmetic word problems : A negative priming study in mathematics experts. *Learning and Instruction*, *45*, 40-48.  
<https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2016.06.004>
- Lubin, A., Vidal, J., Lanoë, C., Houdé, O., & Borst, G. (2013). Inhibitory control is needed for the resolution of arithmetic word problems : A developmental negative priming study. *Journal of Educational Psychology*, *105*(3), 701.  
<https://doi.org/10.1037/a0032625>
- Luyat, M., & Regia-Corte, T. (2009). Les affordances : de James Jerome Gibson aux formalisations récentes du concept. *L'Année Psychologique*, *109*(02), 297-332.  
<https://doi.org/10.4074/S000350330900205X>
- Lyons, K. E., & Ghetti, S. (2013). I don't want to pick! Introspection on uncertainty supports early strategic behavior. *Child Development*, *84*(2), 726-736.  
<https://doi.org/10.1111/cdev.12004>
- Major, L., Haßler, B., & Hennessy, S. (2017). Tablet use in schools : Impact, affordances and considerations. In A. Marcus-Quinn & T. Hourigan (Eds.), *Handbook on digital learning for K-12 schools* (p. 115-128). Springer International Publishing.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-33808-8\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-33808-8_8)
- Máñez, I. & Vidal-Abarca, E. (2020). Question-answering skills: The role of feedback in digital environments. *Enfance*, *3*, 313-335. <https://doi.org/10.3917/enf2.203.0313>.
- Marcus, M., Haden, C.A., & Uttal, D.A. (2017). STEM learning and transfer in a children's museum and beyond. *Merrill-Palmer Quarterly*, *63*(2), 155.
- Marcus, M., Haden, C. A., & Uttal, D. H. (2018). Promoting children's learning and transfer across informal science, technology, engineering, and mathematics learning experiences. *Journal of Experimental Child Psychology*, *175*, 80-95.  
<https://doi.org/10.1016/j.jecp.2018.06.003>

- Markman, E. M. (1978). Empirical versus logical solutions to part-whole comparison problems concerning classes and collections. *Child Development*, 49(1), 168-177.
- Martin, T., & Schwartz, D. L. (2005). Physically distributed learning: Adapting and reinterpreting physical environments in the development of fraction concepts. *Cognitive Science*, 29(4), 587-625. [https://doi.org/10.1207/s15516709cog0000\\_15](https://doi.org/10.1207/s15516709cog0000_15)
- Mayer, R. E. (2016). What should be the role of computer games in education? *Policy Insights from the Behavioral and Brain Sciences*, 3(1), 20-26. <https://doi.org/10.1177/2372732215621311>
- Mayer, R. E. (2008). Applying the science of learning: Evidence-based principles for the design of multimedia instruction. *American Psychologist*, 63(8), 760-769. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.63.8.760>
- Mayer, R. E. (2005). Cognitive theory of multimedia learning. *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*, 41, 31-48.
- Mayer, R. E., Heiser, J., & Lonn, S. (2001). Cognitive constraints on multimedia learning: When presenting more material results in less understanding. *Journal of Educational Psychology*, 93(1), 187-198. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.93.1.187>
- Mayer, R. E., & Moreno, R. (1998). A split-attention effect in multimedia learning: Evidence for dual processing systems in working memory. *Journal of Educational Psychology*, 90(2), 312-320.
- McNeil, N. M. (2008). Limitations to Teaching Children  $2 + 2 = 4$ : Typical arithmetic problems can hinder learning of mathematical equivalence. *Child Development*, 79(5), 1524-1537. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2008.01203.x>
- Milla, K., Bakhshipour, E., Bodt, B., & Getchell, N. (2019). Does movement matter? Prefrontal cortex activity during 2D vs. 3D performance of the tower of Hanoi puzzle. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, 156. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00156>
- Miller, M. R., Giesbrecht, G. F., Müller, U., McInerney, R. J., & Kerns, K. A. (2012). A latent variable approach to determining the structure of executive function in preschool children. *Journal of Cognition and Development*, 13(3), 395-423. <https://doi.org/10.1080/15248372.2011.585478>
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81-97. <https://doi.org/10.1037/h0043158>

- Mischel, W., Ebbesen, E. B., & Raskoff Zeiss, A. (1972). Cognitive and attentional mechanisms in delay of gratification. *Journal of Personality and Social Psychology*, 21(2), 204-218. <https://doi.org/10.1037/h0032198>
- Mischel, W., Shoda, Y., & Rodriguez, M. (1989). Delay of gratification in children. *Science*, 244(4907), 933-938. <https://doi.org/10.1126/science.2658056>
- Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012). The Nature and organization of individual differences in executive functions : Four general conclusions. *Current Directions in Psychological Science*, 21(1), 8-14. <https://doi.org/10.1177/0963721411429458>
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “frontal lobe” tasks : A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49-100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>
- Monette, S., & Bigras, M. (2008). La mesure des fonctions exécutives chez les enfants d'âge préscolaire. *Canadian Psychology/Psychologie Canadienne*, 49(4), 323-341. <https://doi.org/10.1037/a0014000>
- Moser, A., Zimmermann, L., Dickerson, K., Grenell, A., Barr, R., & Gerhardstein, P. (2015). They can interact, but can they learn? Toddlers' transfer learning from touchscreens and television. *Journal of Experimental Child Psychology*, 137, 137-155. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.04.002>
- Mulet, J., van de Leemput, C., & Amadiou, F. (2019). A critical literature review of perceptions of tablets for learning in primary and secondary schools. *Educational Psychology Review*, 31(3), 631-662. <https://doi.org/10.1007/s10648-019-09478-0>
- Mutlu-Bayraktar, D., Cosgun, V., & Altan, T. (2019). Cognitive load in multimedia learning environments: A systematic review. *Computers & Education*, 141, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103618>
- Newell, A., & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-hall.
- Nigg, J. T. (2000). On inhibition/disinhibition in developmental psychopathology : Views from cognitive and personality psychology and a working inhibition taxonomy. *Psychological Bulletin*, 126(2), 220-246. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.126.2.220>
- Noack, H., Lövdén, M., & Schmiedek, F. (2014). On the validity and generality of transfer effects in cognitive training research. *Psychological Research*, 78(6), 773-789. <https://doi.org/10.1007/s00426-014-0564-6>

- Nogry, S., & Didierjean, A. (2007). Les erreurs commises lors de la résolution du problème source favorisent-elles le transfert analogique ? Un réexamen de la recherche de Gick et McGarry (1992). *Psychologie Française*, 52(3), 341-353.  
<https://doi.org/10.1016/j.psfr.2006.12.006>
- Nokes, T. J. (2009). Mechanisms of knowledge transfer. *Thinking & Reasoning*, 15(1), 1-36.  
<https://doi.org/10.1080/13546780802490186>
- Pacton, S., Perruchet, P., Fayol, M., & Cleeremans, A. (2001). Implicit learning out of the lab : The case of orthographic regularities. *Journal of Experimental Psychology : General*, 130(3), 401-426. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.130.3.401>
- Park, B., Flowerday, T., & Brünken, R. (2015). Cognitive and affective effects of seductive details in multimedia learning. *Computers in Human Behavior*, 44, 267-278.  
<https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.10.061>
- Park, B., Moreno, R., Seufert, T., & Brünken, R. (2011). Does cognitive load moderate the seductive details effect? A multimedia study. *Computers in Human Behavior*, 27(1), 5-10.  
<https://doi.org/10.1016/j.chb.2010.05.006>
- Perruchet, P., & Vinter, A. (2002). The self-organizing consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, 25(3), 297-330. <https://doi.org/10.1017/S0140525X02000067>
- Piaget, J. (1937). *La construction du réel chez l'enfant*. Delachaux & Niestle.
- Piaget, J. (1967). *La psychologie de l'intelligence*. Paris : Armand colin.
- Ponitz, C. C., McClelland, M. M., Matthews, J. S., & Morrison, F. J. (2009). A structured observation of behavioral self-regulation and its contribution to kindergarten outcomes. *Developmental Psychology*, 45(3), 605-619. <https://doi.org/10.1037/a0015365>
- Prencipe, A., Kesek, A., Cohen, J., Lamm, C., Lewis, M. D., & Zelazo, P. D. (2011). Development of hot and cool executive function during the transition to adolescence. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(3), 621-637.  
<https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.09.008>
- Presseau, A. (2000). Analyse de l'efficacité d'interventions sur le transfert des apprentissages en mathématiques. *Revue des Sciences de l'Education*, 26 (3), 515-544.
- Radesky, J. S., & Christakis, D. A. (2016). Increased screen time. *Pediatric Clinics of North America*, 63(5), 827-839. <https://doi.org/10.1016/j.pcl.2016.06.006>
- Reber, A. S. (1989). Implicit learning and tacit knowledge. *Journal of Experimental Psychology : General*, 118(3), 2196- 235. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.118.3.219>

- Rebello, N.S., Zollman, D.A., Allbaugh, A.R., Engelhardt, P.V., Gray, K.E., Hrepic, Z., & Itza-Ortiz, S.F. (2005). Dynamic transfer: a perspective from physics education research. In J. Mestre (Ed.), *Transfer of learning from a modern multidisciplinary perspective* (pp. 357-370). Greenwich, CT: Information Age Publishing.
- Reed, S. K. (2012). Learning by mapping across situations. *Journal of the Learning Sciences*, 21(3), 353-398. <https://doi.org/10.1080/10508406.2011.607007>
- Resch, C., Keulers, E., Martens, R., van Heugten, C., & Hurks, P. (2019). Does strategy instruction on the Rey-Osterrieth Complex Figure task lead to transferred performance improvement on the modified Taylor complex figure task ? A randomized controlled trial in school-aged children. *The Clinical Neuropsychologist*, 33(1), 108-123. <https://doi.org/10.1080/13854046.2018.1448438>
- Resing, W. C. M., Bakker, M., Pronk, C. M. E., & Elliott, J. G. (2016). Dynamic testing and transfer : An examination of children's problem-solving strategies. *Learning and Individual Differences*, 49, 110-119. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2016.05.011>
- Richard, J.-F. (1982). Planification et organisation des actions dans la résolution du problème de la tour de Hanoï par des enfants de 7 ans. *L'Année Psychologique*, 82(2), 307-336. <https://doi.org/10.3406/psy.1982.28422>
- Richard, J. F., Clément, E., & Tijus, C. A. (2002). Les composantes sémantiques dans la résolution de problèmes isomorphes. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 16(1-2), 191-219. [https://doi.org/10.1207/s15516709cog1704\\_2](https://doi.org/10.1207/s15516709cog1704_2)
- Richard, J.-F., Poitrenaud, S., & Tijus, C. (1993). Problem-solving restructuring : Elimination of implicit constraints. *Cognitive Science*, 17(4), 497-529.
- Rideout, V. (2013). Zero to eight : Children's media use in America 2013. Récupéré sur <http://www.common-sensemedia.org>
- Rideout, V. J. (2014). Learning at home: Families' educational media use in America. A report of the Families and Media Project. New York, NY: The Joan Ganz Cooney Center at Sesame Workshop.
- Rideout, V. J., Foehr, U. G., & Roberts, D. F. (2010). Generation M: Media in the lives of 8 to 18 year olds. Menlo Park, CA: The Kaiser Family Foundation.
- Riggs, A. E., Alibali, M. W., & Kalish, C. W. (2015). Leave her out of it: Person-presentation of strategies is harmful for transfer. *Cognitive Science*, 39(8), 1965-1978. <https://doi.org/10.1111/cogs.12224>

- Riggs, A. E., Alibali, M. W., & Kalish, C. W. (2017). Does it matter how Molly does it? Person-presentation of strategies and transfer in mathematics. *Contemporary Educational Psychology, 51*, 315-320. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2017.09.001>
- Ripoll, T., & Coulon, D. (2001). Le raisonnement par analogie : Une analyse descriptive et critique des modèles du mapping. *L'Année Psychologique, 101*(2), 289-323. <https://doi.org/10.3406/psy.2001.29559>
- Rittle-Johnson, B. (2006). Promoting Transfer : Effects of self-explanation and direct instruction. *Child Development, 77*(1), 1-15. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2006.00852.x>
- Robinson, S. J., & Brewer, G. (2016). Performance on the traditional and the touch screen, tablet versions of the Corsi Block and the tower of Hanoi tasks. *Computers in Human Behavior, 60*, 29-34. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.02.047>
- Roebbers, C. M. (2017). Executive function and metacognition: Towards a unifying framework of cognitive self-regulation. *Developmental Review, 45*, 31-51. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2017.04.001>
- Ross, B. H. (1989). Distinguishing types of superficial similarities : Different effects on the access and use of earlier problems. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 15*(3), 456-468. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.15.3.456>
- Rossi, S., Lubin, A., Lanoë, C., & Pineau, A. (2012). Une pédagogie du contrôle cognitif pour l'amélioration de l'attention à la consigne chez l'enfant de 4-5 ans. *Neuroéducation, 1*(1), 29-54. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20120101.29>
- Rossi, S., Vidal, J., Letang, M., Houdé, O., & Borst, G. (2019). Adolescents and adults need inhibitory control to compare fractions. *Journal of Numerical Cognition, 5*(3), 314-336. <https://doi.org/10.5964/jnc.v5i3.197>
- Sala, G., & Gobet, F. (2017). Does Far Transfer Exist? Negative Evidence From Chess, Music, and Working Memory Training. *Current Directions in Psychological Science, 26*(6), 515-520. <https://doi.org/10.1177/0963721417712760>.
- Sander, E., & Richard, J. F. (2005). Analogy and transfer: encoding the problem at the right level of abstraction. In *Proceedings of the 27th Annual Conference of the Cognitive Science Society. Stresa, Italy* (pp. 1925-1930).
- Saufley, W. H., Otaka, S. R., & Bavaresco, J. L. (1985). Context effects : Classroom tests and context independence. *Memory & Cognition, 13*(6), 522-528. <https://doi.org/10.3758/BF03198323>

- Schiff, R., & Vakil, E. (2015). Age differences in cognitive skill learning, retention and transfer : The case of the tower of Hanoi puzzle. *Learning and Individual Differences*, 39, 164-171. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2015.03.010>
- Schwartz, D. M. (2014). Breaking Through Barriers : Using technology to address executive function weaknesses and improve student achievement. *Applied Neuropsychology : Child*, 3(3), 173-181. <https://doi.org/10.1080/21622965.2013.875296>
- Schwartz, D. L., Bransford, J. D., and Sears, D. (2005). Efficiency and innovation in transfer. In J. Mestre (Ed.), *Transfer of Learning : Research and Perspectives*. Greenwich, CT : Information Age Publishing.
- Schwartz, D. L., Chase, C. C., & Bransford, J. D. (2012). Resisting overzealous transfer : Coordinating previously successful routines with needs for new learning. *Educational Psychologist*, 47(3), 204-214. <https://doi.org/10.1080/00461520.2012.696317>
- Schwartz, D. L., Chase, C. C., Opezzo, M. A., & Chin, D. B. (2011). Practicing versus inventing with contrasting cases : The effects of telling first on learning and transfer. *Journal of Educational Psychology*, 103(4), 759-775. <https://doi.org/10.1037/a0025140>
- Schweizer, F., Wüstenberg, S., & Greiff, S. (2013). Validity of the MicroDYN approach : Complex problem solving predicts school grades beyond working memory capacity. *Learning and Individual Differences*, 24, 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2012.12.011>
- Shipstead, Z., Redick, T. S., & Engle, R. W. (2010). Does working memory training generalize ? *Psychologica Belgica*, 50(3-4), 245-276. <https://doi.org/10.5334/pb-50-3-4-245>
- Sidney, P. G., & Thompson, C. A. (2019). Implicit analogies in learning : Supporting transfer by warming up. *Current Directions in Psychological Science*, 28(6), 619-625. <https://doi.org/10.1177/0963721419870801>
- Simon, H. A. (1975). The functional equivalence of problem-solving skills. *Cognitive Psychology*, 7(2), 268-288. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(75\)90012-2](https://doi.org/10.1016/0010-0285(75)90012-2)
- Simpson, A., Al Ruwaili, R., Jolley, R., Leonard, H., Geeraert, N., & Riggs, K. J. (2019). Fine motor control underlies the association between response inhibition and drawing skill in early development. *Child Development*, 90(3), 911-923. <https://doi.org/10.1111/cdev.12949>
- Simpson, A., Riggs, K. J., Beck, S. R., Gorniak, S. L., Wu, Y., Abbott, D., & Diamond, A. (2012). Refining the understanding of inhibitory processes : How response prepotency

- is created and overcome: How response prepotency is created and overcome. *Developmental Science*, 15(1), 62-73.  
<https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2011.01105.x>
- Simpson, A., & Riggs, K. J. (2005). Inhibitory and working memory demands of the day-night task in children. *British Journal of Developmental Psychology*, 23(3), 471-486.  
<https://doi.org/10.1348/026151005X28712>
- Skouteris, H., Spataro, J., & Lazaridis, M. (2006). Young children's use of a delayed video representation to solve a retrieval problem pertaining to self. *Developmental Science*, 9(5), 505-517. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2006.00518.x>
- Sperling, G. (1960). The information available in brief visual presentations. *Psychological Monographs: General and Applied*, 74(11), 1-29. <https://doi.org/10.1037/h0093759>
- St Clair-Thompson, H. L., & Gathercole, S. E. (2006). Executive functions and achievements in school : Shifting, updating, inhibition, and working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59(4), 745-759.  
<https://doi.org/10.1080/17470210500162854>
- St. John, A. M., Finch, K., & Tarullo, A. R. (2019). Socioeconomic status and neural processing of a go/no-go task in preschoolers : An assessment of the P3b. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 38, 100677. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100677>
- Stadler, M., Becker, N., Gödker, M., Leutner, D., & Greiff, S. (2015). Complex problem solving and intelligence: A meta-analysis. *Intelligence*, 53, 92-101.  
<https://doi.org/10.1016/j.intell.2015.09.005>
- Stone, M. M., Blumberg, F. C., Blair, C., & Cancelli, A. A. (2016). The “EF” in deficiency : Examining the linkages between executive function and the utilization deficiency observed in preschoolers. *Journal of Experimental Child Psychology*, 152, 367-375.  
<https://doi.org/10.1016/j.jecp.2016.07.003>
- Straker, L. M., Coleman, J., Skoss, R., Maslen, B. A., Burgess-Limerick, R., & Pollock, C. M. (2008). A comparison of posture and muscle activity during tablet computer, desktop computer and paper use by young children. *Ergonomics*, 51(4), 540-555.  
<https://doi.org/10.1080/00140130701711000>
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18(6), 643-662. <https://doi.org/10.1037/h0054651>
- Strouse, G. A., & Ganea, P. A. (2017). Toddlers' word learning and transfer from electronic and print books. *Journal of Experimental Child Psychology*, 156, 129-142.  
<https://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.05.010>

- Strouse, G. A., & Troseth, G. L. (2008). "Don't try this at home": Toddlers' imitation of new skills from people on video. *Journal of Experimental Child Psychology*, 101(4), 262-280. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.05.010>
- Suddendorf, T. (2003). Early representational insight : Twenty-four-month-olds can use a photo to find an object in the world. *Child Development*, 74(3), 896-904. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00574>
- Sundararajan, N., & Adesope, O. O., (2020). Keep it coherent : A meta-analysis of the seductive details effect. *Educational Psychology Review*, 32(3), 707-734. <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09522-4>
- Sweller, J. (2005). Implications of cognitive load theory for multimedia learning. *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*, 3(2), 19-30.
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving : Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257-285. [https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202\\_4](https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4)
- Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and Instruction*, 4(4), 295-312. [https://doi.org/10.1016/0959-4752\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0959-4752(94)90003-5)
- Sweller, J., van Merriënboer, J. J., & Paas, F. (2019). Cognitive architecture and instructional design: 20 years later. *Educational Psychology Review*, 31(2), 261-292.
- Tarasuik, J., Demaria, A., & Kaufman, J. (2017). Transfer of problem-solving skills from touchscreen to 3D model by 3- to 6-year-olds. *Frontiers in Psychology*, 8, 1-6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01586>
- Tettegah, S., McCreery, M., & Blumberg, F. (2015). Toward a framework for learning and digital games research. *Educational Psychologist*, 50(4), 253-257. <https://doi.org/10.1080/00461520.2015.1134330>
- Thibaut, J.-P., French, R., & Vezneva, M. (2010). The development of analogy making in children : Cognitive load and executive functions. *Journal of Experimental Child Psychology*, 106(1), 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.01.001>
- Thibaut, J. P., French, R. M., Vezneva, M., Gérard, Y., & Glady, Y. (2011). Semantic analogies by young children: testing the role of inhibition. *European Perspectives on Cognitive Science*, 136-140.
- Thibaut, J.-P., Gelaes, S., & Murphy, G. L. (2018). Does practice in category learning increase rule use or exemplar use-Or both ? *Memory & Cognition*, 46(4), 530-543. <https://doi.org/10.3758/s13421-017-0782-4>

- Thibaut, J.-P., & Witt, A. (2015). Young children's learning of relational categories : Multiple comparisons and their cognitive constraints. *Frontiers in Psychology*, 6, 1-10. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00643>
- Tricot, A. (1998). Charge cognitive et apprentissage. Une présentation des travaux de John Sweller. *Revue de Psychologie de l'Education*, 3, 37-64.
- Tricot, A. (2020). *Quelles fonctions pédagogiques bénéficient des apports du numérique ?* Paris : Cnesco.
- Tricot, A., & Sweller, J. (2014). Domain-specific knowledge and why teaching generic skills does not work. *Educational Psychology Review*, 26(2), 265-283. <https://doi.org/10.1007/s10648-013-9243-1>
- Tulving, E., & Thomson, D. M. (1973). Encoding specificity and retrieval processes in episodic memory. *Psychological Review*, 80(5), 352.
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1974). Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Science*, 185(4157), 1124-1131. <https://doi.org/10.1126/science.185.4157.1124>
- Usai, M. C., Viterbori, P., Traverso, L., & De Franchis, V. (2014). Latent structure of executive function in five- and six-year-old children : A longitudinal study. *European Journal of Developmental Psychology*, 11(4), 447-462. <https://doi.org/10.1080/17405629.2013.840578>
- van Bers, B. M. C. W., van Schijndel, T. J. P., Visser, I., & Raijmakers, M. E. J. (2020). Cognitive flexibility training has direct and near transfer effects, but no far transfer effects, in preschoolers. *Journal of Experimental Child Psychology*, 193, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2020.104809>
- Vergnaud, G. (2011). La pensée est un geste comment analyser la forme opératoire de la connaissance. *Enfance*, (1), 37-48.
- Vogelaar, B., & Resing, W. C. M. (2018). Changes over time and transfer of analogy-problem solving of gifted and non-gifted children in a dynamic testing setting. *Educational Psychology*, 38(7), 898-914. <https://doi.org/10.1080/01443410.2017.1409886>
- Wallon, H. (1959). Les milieux, les groupes et la psychogenèse de l'enfant. *Enfance*, 12(3), 287-296. <https://doi.org/10.3406/enfan.1959.1444>
- Wang, Z., & Adesope, O. (2014). Effects of seductive details on multimedia learning. *Journal of Studies in Education*, 4(3), 32-44. <https://doi.org/10.5296/jse.v4i3.6024>
- Wang, Z., Sundararajan, N., Adesope, O.O., & Ardasheva, Y. (2017). Moderating the seductive details effect in multimedia learning with note-taking : Seductive details and note-taking. *British Journal of Educational Technology*, 48(6), 1380-1389.

<https://doi.org/10.1111/bjet.12476>

- Welsh, M. C., & Huizinga, M. (2005). Tower of Hanoi disk-transfer task : Influences of strategy knowledge and learning on performance. *Learning and Individual Differences, 15*(4), 283-298. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2005.05.002>
- Wiebe, S. A., Sheffield, T. D., & Espy, K. A. (2012). Separating the fish from the sharks : A longitudinal study of preschool response inhibition: Development of preschool response inhibition. *Child Development, 83*(4), 1245-1261. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2012.01765.x>
- Wiebe, S. A., Sheffield, T., Nelson, J. M., Clark, C. A. C., Chevalier, N., & Espy, K. A. (2011). The structure of executive function in 3-year-olds. *Journal of Experimental Child Psychology, 108*(3), 436-452. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.08.008>
- Willoughby, M. T., Kupersmidt, J. B., & Voegler-Lee, M. E. (2012). Is preschool executive function causally related to academic achievement? *Child Neuropsychology, 18*(1), 79-91. <https://doi.org/10.1080/09297049.2011.578572>
- Winne, P. H. (2011). A cognitive and metacognitive analysis of self-regulated learning: Faculty of education, Simon Fraser University, Burnaby, Canada. In *Handbook of self-regulation of learning and performance* (pp. 29-46). Londres : Routledge.
- Wisniewski, B., Zierer, K., & Hattie, J. (2020). The power of feedback revisited : A meta-analysis of educational feedback research. *Frontiers in Psychology, 10*, 1-14.
- Wohlwill, J. F. (1968). Responses to class-inclusion questions for verbally and pictorially presented items. *Child Development, 39*(2), 449-465. <https://doi.org/10.2307/1126957>
- Wong, R. M., & Adesope, O. O. (2021). Meta-analysis of emotional designs in multimedia learning : A replication and extension study. *Educational Psychology Review, 33*(2), 357-385. <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09545-x>
- Woodworth, R. S., & Thorndike, E. L. (1901). The influence of improvement in one mental function upon the efficiency of other functions. *Psychological Review, 8*(3), 247-261. <https://doi.org/10.1037/h0074898>
- Wright, I., Waterman, M., Prescott, H., & Murdoch-Eaton, D. (2003). A new Stroop-like measure of inhibitory function development : Typical developmental trends: A new measure of inhibitory function development. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, 44*(4), 561-575. <https://doi.org/10.1111/1469-7610.00145>
- Wynn, K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature, 358*(6389), 749-750.

- Xie, H., Peng, J., Qin, M., Huang, X., Tian, F., & Zhou, Z. (2018). Can touchscreen devices be used to facilitate young children's learning ? A meta-analysis of touchscreen learning effect. *Frontiers in Psychology*, 9, 1-15. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02580>
- Xu, F., Han, Y., Sabbagh, M. A., Wang, T., Ren, X., & Li, C. (2013). Developmental differences in the structure of executive function in middle childhood and adolescence. *PLoS ONE*, 8(10), 1-9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077770>
- Yagolkovskiy, S. R., & Medvedev, B. P. (2020). Enhancement of creativity : Semantic priming through naming objects loosens functional fixedness within idea generation. *The Journal of Creative Behavior*, 54(4), 1013-1020. <https://doi.org/10.1002/jocb.422>
- Yoshida, H., Tran, D. N., Benitez, V., & Kuwabara, M. (2011). Inhibition and adjective learning in bilingual and monolingual children. *Frontiers in Psychology*, 2, 1-14.
- Zack, E., & Barr, R. (2016). The Role of interactional quality in learning from touch screens during infancy : Context matters. *Frontiers in Psychology*, 07, 1-12.
- Zack, E., Barr, R., Gerhardstein, P., Dickerson, K., & Meltzoff, A. N. (2009). Infant imitation from television using novel touch screen technology. *British Journal of Developmental Psychology*, 27(1), 13-26. <https://doi.org/10.1348/026151008X334700>
- Zack, E., Gerhardstein, P., Meltzoff, A. N., & Barr, R. (2013). 15-month-olds' transfer of learning between touch screen and real-world displays : language cues and cognitive loads. *Scandinavian Journal of Psychology*, 54(1), 20-25. <https://doi.org/10.1111/sjop.12001>
- Zamora, E. V., Vernucci, S., del Valle, M., Introzzi, I., & Richard's, M. M. (2020). Assessing cognitive inhibition in emotional and neutral contexts in children. *The Educational and Developmental Psychologist*, 37(1), 56-66. <https://doi.org/10.1017/edp.2020.4>
- Zanga, A., Richard, J.-F., & Tijus, C. (2004). Implicit learning in rule induction and problem solving. *Thinking & Reasoning*, 10(1), 55-83. <https://doi.org/10.1080/13546780342000034>
- Zelazo, P. D., & Müller, U. (2002). Executive function in typical and atypical development. In U. Goswami (Ed.), *Handbook of childhood cognitive development*. Oxford: Blackwell.
- Zhong-Hua He, Bing-Hua Li & Wen-Gang Yin (2019): Executive function and mental rotation during middle childhood: The effect of age. *The Journal of Genetic Psychology*, 180(2-3), 96-102. <https://doi.org/10.1080/00221325.2019.1582474>
- Ziegler, E., Edelsbrunner, P. A., & Stern, E. (2021). The benefit of combining teacher-direction with contrasted presentation of algebra principles. *European Journal of Psychology of Education*, 36(1), 187-218. <https://doi.org/10.1007/s10212-020-00468-3>

Zook, N. A., Davalos, D. B., DeLosh, E. L., & Davis, H. P. (2004). Working memory, inhibition, and fluid intelligence as predictors of performance on tower of Hanoi and London tasks. *Brain and Cognition*, *56*(3), 286-292.

<https://doi.org/10.1016/j.bandc.2004.07.003>

Zosh, J. M., Lytle, S. R., Golinkoff, R. M., & Hirsh-Pasek, K. (2017). Putting the education back in educational apps : How content and context interact to promote learning. In R. Barr & D. N. Linebarger (Éds.), *Media exposure during infancy and early childhood* (p. 259-282). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-45102-](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45102-2_17)

[2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45102-2_17)

# **ANNEXES**

## Annexe 1: Avis du Comité d'éthique en sciences comportementales



### Comité d'éthique en sciences comportementales

Président :

Yvonne DELEVOYE-TURRELL

Président adjoint :

Céline DOUILLIEZ

Personne ressource (dossier administratif) :

Aurélie DUCROQUET

Tél : 03.20.41.67.92 -

E-mail : [aurelie.ducroquet@univ-lille3.fr](mailto:aurelie.ducroquet@univ-lille3.fr)

Villeneuve d'Ascq le 09/01/2018

<b>Références comité d'éthique :</b>	<b>2017-6-S56</b>
<b>Sigle :</b>	<b>TANERI</b>
<b>Numéro de version et date :</b>	<b>Version 2 du 27/11/2018Lille 3</b>
<b>Promoteur :</b>	<b>Jérôme Clerc</b>
<b>Porteur projet :</b>	

<b>Date de la</b>	<b>01/11/201</b>
<b>Date de la réunion du comité d'éthique :</b>	
<b>Avis du comité</b>	<b>AVIS</b>
<i>Le protocole est accepté en état. Si pour une quelconque raison, vous souhaitez modifier le protocole (en terme de calendrier, inclusion d'un nouveau groupe...), vous êtes tenu d'informer le comité d'éthique par l'envoi d'un avenant expliquant les motivations mais également les modifications apportées au protocole initial.</i>	

Pr Yvonne DELEVOYE-TURRELL  
Présidente du comité d'éthique

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Y. Delevoye'.

## Annexe 2 : Test d'inhibition comportementale HTKS (Ponitz et al., 2009)

Identifiant de l'enfant :

# TETE-EPAULE-GENOU-PIED (TEGP)

©2011 Cameron & McClelland pour l'édition originale anglaise (HTKS)

©2016 Clerc pour la traduction française

### FORME A – Etendue

Parties I, II et III

#### REFERENCES:

- McClelland, M. M., Cameron, C. E., Connor, C. M., Farris, C. L., Jewkes, A. M., & Morrison, F. J. (2007). Links between behavioral regulation and preschoolers' literacy, vocabulary, and math skills. *Developmental Psychology, 43*, 947-959.
- Cameron Ponitz, C. E., McClelland, M. M., Matthews, J. S., & Morrison, F. J. (2009). A structured observation of behavioral self-regulation and its contribution to kindergarten outcomes. *Developmental Psychology, 45*, 605-619.
- Cameron Ponitz, C. E., McClelland, M. M., Jewkes, A. M., Connor, C. M., Farris, C. L., & Morrison, F. J. (2008). Touch your toes! Developing a direct measure of behavioral regulation in early childhood. *Early Childhood Research Quarterly, 23*.

*Consignes: Après établissement d'un contact positif avec l'enfant, lisez à voix haute les instructions en gras. Les mots en LETTRES CAPITALES doivent être accentués. Vous pouvez administrer la tâche en étant vous-même assis ou debout; L'enfant lui doit se tenir debout pendant toute la durée de la tâche, à 1 mètre de vous environ. Administrez la Partie II si l'enfant obtient au moins 4 points au Test de la Partie I. Administrez la Partie III si l'enfant obtient au moins 4 points au Test de la Partie II.*

*Le symbole du personnage indique que vous devez vous-même effectuer le mouvement indiqué, afin de montrer clairement à l'enfant le mouvement correct à effectuer. Si l'enfant produit tout de suite le mouvement correct (opposé), attribuez 2 points à l'item. S'il s'auto-corrige et donne la réponse correcte, attribuez 1 point à l'item. S'il touche la partie de son corps nommée ou ne touche aucune partie de son corps, attribuez 0 point à l'item.*



*On considère qu'il y a auto-correction quand l'enfant commence à produire un mouvement vers une partie du corps non appropriée, mais change d'avis et produit la réponse correcte. Prendre le temps de réfléchir sans bouger puis produire la réponse correcte ne constitue pas une auto-correction, et doit donc être jugée comme une réponse correcte appelant le score 2 à l'item.*

#### COPYRIGHT STATEMENT

Copyright and other intellectual property laws protect these materials. Reproduction or retransmission of the materials, in whole or in part, in any manner, without the prior written consent of the copyright holder, is a violation of copyright law. Users may not distribute such copies to others, whether or not in electronic form, whether or not for a charge or other consideration, without prior written consent of the copyright holder of the materials. Users may not post the task online. Contact Megan McClelland (megan.mcclelland@virginia.edu) or Claire Cameron (ccp2n@virginia.edu) for requests for permission to reproduce the Head-Toes-Knees-Shoulders task.

**PARTIE I: PHASE INTRODUCTION**

Maintenant nous allons jouer à un jeu. Le jeu a deux parties. Pour commencer, fais comme moi. Touche ta tête.



Touchez votre tête; attendez que l'enfant touche sa tête.

Bien, maintenant touche tes pieds



Touchez vos pieds; attendez que l'enfant ait touché ses pieds.

Répétez une fois chaque consigne accompagnée du mouvement indiqué, ou si nécessaire plusieurs fois jusqu'à ce que l'enfant vous imite correctement.

**PARTIE I : PHASE DE PRATIQUE**

Maintenant nous allons faire comme si nous étions un petit peu bêtêtes, en faisant le **CONTRAIRE** de ce que je dis. Quand je dis touche ta TETE, **AU LIEU DE** toucher ta tête, tu touches tes PIEDS. Quand je dis touche tes PIEDS, tu touches ta TETE. Tu fais donc quelque chose **DIFFERENT** de ce que je dis.



*\*Si l'enfant répond correctement: Donnez un feedback positif pour chaque item réussi.*

*\*\*Si l'enfant ne répond pas correctement à l'un quelconque des essais de pratique,*

*fournissez jusqu'à 3 explications supplémentaires avant de commencer la phase de test:*

Rappelle-toi, quand je dis touche ta/tes \_\_\_\_, tu touches ta/tes \_\_\_\_  
comme ça tu fais quelque chose **DIFFERENT** de ce que je dis. Essaie encore.

→ Nb d'explications supplémentaires fournies: 0 1 2 3



	<i>Incorrect</i>	<i>auto-corrigé</i>	<i>Correct</i>
A1. Que fais-tu si je dis "touche ta tête"?	0 (autre que pieds)	1	2 (pieds)
A2. Que fais-tu si je dis "touche tes pieds"?	0 (autre que tête)	1	2 (tête)

*Si l'enfant répond verbalement: "peux-tu m'a montrer?"*

Ok, encore quelques-uns.

	<i>Incorrect</i>	<i>auto-corrigé</i>	<i>Correct</i>
B1. Touche ta tête	0 (autre que pieds)	1	2 (pieds)
B2. Touche tes pieds	0 (autre que tête)	1	2 (tête)
B3. Touche ta tête	0 (autre que pieds)	1	2 (pieds)
B4. Touche tes pieds	0 (autre que tête)	1	2 (tête)

Passer à la **PARTIE I PHASE TEST**. Ne donnez plus aucune explication supplémentaire. Ne fournissez pas de feedback pendant la **PHASE TEST**.

**PARTIE I : PHASE TEST**

Nous continuons à jouer à ce jeu, et tu continues à faire le **CONTRAIRE** de ce que je dis.

	<u>Incorrect</u>	<u>auto-corrigé</u>	<u>Correct</u>
1. Touche ta tête	0 (autre que pieds)	1	2 (pieds)
2. Touche tes pieds	0 (autre que tête)	1	2 (tête)
3. Touche tes pieds	0 (autre que tête)	1	2 (tête)
4. Touche ta tête	0 (autre que pieds)	1	2 (pieds)
3. Touche tes pieds	0 (autre que tête)	1	2 (tête)
6. Touche ta tête	0 (autre que pieds)	1	2 (pieds)
7. Touche ta tête	0 (autre que pieds)	1	2 (pieds)
8. Touche tes pieds	0 (autre que tête)	1	2 (tête)
9. Touche ta tête	0 (autre que pieds)	1	2 (pieds)
10. Touche tes pieds	0 (autre que tête)	1	2 (tête)

**TOTAL POINTS** →  **SI L'ENFANT OBTIENT AU MOINS 4 POINTS, PASSEZ A LA PARTIE II**

SI L'ENFANT OBTIENT MOINS DE 4 POINTS :

Merci d'avoir joué à ce jeu avec moi aujourd'hui!

**PART II : PHASE INTRODUCTION**

Ok, maintenant que tu as fait cette partie, nous allons en faire une deuxième. Maintenant, tu vas toucher tes épaules et tes genoux. D'abord, touche tes épaules.



Touchez vos épaules; attendez que l'enfant ait touché ses épaules.

Maintenant, touche tes genoux.



Touchez vos genoux; attendez que l'enfant ait touché ses genoux.

Répétez une fois chaque consigne accompagnée du mouvement indiqué, ou si nécessaire plusieurs fois jusqu'à ce que l'enfant vous imite correctement.

**PARTIE II : PHASE DE PRATIQUE**

Ok, maintenant nous allons refaire comme si nous étions un petit peu bêtes, en faisant le CONTRAIRE de ce que je dis, comme tout à l'heure. Mais cette fois, touche tes genoux et tes épaules. Quand je dis touche tes GENOUX, tu touches tes EPAULES, et quand je dis touche tes EPAULES, tu touches tes GENOUX.



\*Si l'enfant répond correctement: Donnez un feedback positif pour chaque item réussi.

\*\*Si l'enfant ne répond pas correctement à l'un quelconque des essais de pratique,

fournissez jusqu'à 2 explications supplémentaires avant de commencer la phase de test:

Rappelle-toi, quand je dis touche tes \_\_\_\_\_, au lieu de toucher tes \_\_\_\_\_, tu touches tes \_\_\_\_\_. Fais le CONTRAIRE de ce que je dis.

→ Nb d'explications supplémentaires fournies : 0 1 2



	Incorrect	auto-corrigé	Correct
C1. Que fais-tu si je dis "touche tes genoux"?	0 (autre que épaules)	1	2 (épaules)
<i>Si l'enfant répond verbalement: "peux-tu me montrer?"</i>			
	Incorrect	auto-corrigé	Correct
D1. Touche tes genoux	0 (autre que épaules)	1	2 (épaules)
D2. Touche tes épaules	0 (autre que genoux)	1	2 (genoux)
D3. Touche tes genoux	0 (autre que épaules)	1	2 (épaules)
D4. Touche tes épaules	0 (autre que genoux)	1	2 (genoux)

Passer à la PARTIE II PHASE TEST. Ne donnez plus aucune explication supplémentaire. Ne fournissez pas de feedback pendant la PHASE TEST.

PARTIE II : PHASE TEST

Maintenant que tu connais toutes les parties, nous allons les mettre ensemble. Tu vas continuer à faire le contraire de ce que je dis, mais tu ne sauras pas ce que je vais dire.

Il y a quatre choses que je peux dire:

- Si je dis touche ta TÊTE, tu touches tes PIEDS.
- Si je dis touche tes PIEDS, tu touches ta TÊTE.
- Si je dis touche tes GENOUX, tu touches tes EPAULES.
- Si je dis touche tes EPAULES, tu touches tes GENOUX.



Tu es prêt? Essayons.

	<u>Incorrect</u>	<u>auto-corrigé</u>	<u>Correct</u>
11. Touche ta tête	0 (autre que pieds)	1	2 (pieds)
12. Touche tes pieds	0 (autre que tête)	1	2 (tête)
13. Touche tes genoux	0 (autre que épaules)	1	2 (épaules)
14. Touche tes pieds	0 (autre que tête)	1	2 (tête)
15. Touche tes épaules	0 (autre que genoux)	1	2 (genoux)
16. Touche ta tête	0 (autre que pieds)	1	2 (pieds)
17. Touche tes genoux	0 (autre que épaules)	1	2 (épaules)
18. Touche tes genoux	0 (autre que épaules)	1	2 (épaules)
19. Touche tes épaules	0 (autre que genoux)	1	2 (genoux)
20. Touche tes pieds	0 (autre que tête)	1	2 (tête)

TOTAL POINTS →  SI L'ENFANT OBTIENT AU MOINS **4** POINTS, PASSEZ A LA PARTIE III

SI L'ENFANT OBTIENT MOINS DE **4** POINTS :  Merci d'avoir joué à ce jeu avec moi aujourd'hui!

**PARTIE III INTRODUCTION**

Tu l'as bien fait. Nous avons juste une partie de plus. Nous allons changer les règles du jeu.

Quand je dis touche ta TÊTE, tu touches tes GENOUX.  
 Quand je dis touche tes GENOUX, tu touches ta TÊTE.  
 Quand je dis touche tes EPAULES, tu touches tes PIEDS.  
 Quand je dis touche tes PIEDS, tu touches tes EPAULES  
 Ok? Pratiquons!



*\*Si l'enfant répond correctement: donnez un feedback positif pour chaque item où l'enfant répond correctement.*

*\*\*Si l'enfant ne répond pas correctement, à un quelconque des essais durant la phase de pratique donnez jusqu'à 2 explications supplémentaires avant de commencer la phase test*

Souviens-toi, nous avons changé les règles. "Touche ta tête" signifie touche tes genoux, – tête va avec genoux maintenant. "Touche tes épaules " signifie touche tes pieds, épaules va avec pieds.

Nombre d'explications supplémentaires:    0    1    2



**PARTIE III , PHASE**

**DE PRATIQUE:**

	Incorrect	auto-corrigé	correct
E1. Que fais-tu si je dis "touche ta tête?"	0 (autre que genoux)	1	2 (genoux)
E2. Que fais-tu si je dis "touches tes épaules?"	0 (autre que pieds)	1	2 (pieds)
<i>Si l'enfant répond verbalement: "peux-tu me montrer?"</i>			
	Incorrect	auto-corrigé	correct
F1. Touche ta tête	0 (autre que genoux)	1	2 (genoux)
F2. Touches tes épaules	0 (autre que pieds)	1	2 (pieds)
F3. Touche tes pieds	0 (autre que épaules)	1	2 (épaules)
F4. Touche tes genoux	0 (autre que tête)	1	2 (tête)

**Tu es genial! Faisons un peu plus.**

*Passer à la partie III, phase test. Ne plus rien expliquer lors de la phase test. Ne donnez pas de feedback pendant la phase test.*

PARTIE III, PHASE

<u>TEST :</u>	<u>Incorrect</u>	<u>auto-corrigé</u>	<u>Correct</u>
21. Touches tes épaules	0 (autre que pieds)	1	2 (pieds)
22. Touche ta tête	0 (autre que genoux)	1	2 (genoux)
23. Touche tes genoux	0 (autre que tête)	1	2 (tête)
24. Touche tes pieds	0 (autre que épaules)	1	2 (épaules)
25. Touches tes pieds	0 (autre que épaules)	1	2 (épaules)
26. Touche tes genoux	0 (autre que tête)	1	2 (tête)
27. Touche tes épaules	0 (autre que pieds)	1	2 (pieds)
28. Toucheta tête	0 (autre que genoux)	1	2 (genoux)
29. Touch eta tête	0 (autre que genoux)	1	2 (genoux)
30. Touche tes épaules	0 (autre que pieds)	1	2 (pieds)

Merci d'avoir joué à ce jeu avec moi aujourd'hui!

## Annexe 3 : Avis du Comité d’Ethique pour la Recherche Grenoble Alpes



### **CER Grenoble Alpes**

#### **Comité d’Ethique pour les Recherches Grenoble Alpes**

Objet : Avis sur le projet « TrAnsfert Numérique chez l’Enfant : Similarité des tâches et des contextes, et contribution de l’Inhibition Cognitive (TANESIC) » présenté par Jérôme Clerc du Laboratoire LPNC Université Grenoble-Alpes à Grenoble.

Compte tenu des éléments fournis dans la demande par Jérôme Clerc, le Comité d’Ethique pour les Recherches Grenoble Alpes émet un AVIS FAVORABLE.

Il relève de la responsabilité des chercheurs de se conformer à leurs obligations légales notamment en ce qui concerne les aspects informatiques et libertés, ou encore l’homologation du lieu de recherche.

**Numéro de l’avis : CER Grenoble Alpes-Avis-2020-01-28-3**

A Grenoble, le 03/03/2020

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Olivier Pascalis', written over a horizontal line.

Le Président du CER  
Grenoble Alpes,  
Olivier Pascalis  
Université Grenoble Alpes